

result of active scientific activity of academician V. Kramarov was the publication of number of scientific developments, the list of which includes work covering the application of tolerances and landings in repaired case, use the graphical method of production planning in repair shops, determine the nature and causes of faults machines. Scientists carried out the work in determining and shaping the basic principles of design and production of machine-tractor workshops. His scientific research and development for the improvement of technology of repair of tractors, cars and farm machinery were the basis of the same name writing and publishing textbooks for mechanical machine and tractor stations. It is also important during the election and work V. Kramarova Academician and Vice President of the Ukrainian Academy of Agricultural Sciences, Director of Ukrainian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture. His work in this period in theory and calculation of production processes became basis of methods of analysis and engineering calculation processes of mechanized cultivation of crops. The paper presents a galaxy of followers V. Kramarova scientific school and their achievements.

Keywords: scientific school, training of engineering specialists, machine repairs

УДК 631.363.285

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГВИНТОВОГО ГРАНУЛЯТОРА КОРМІВ

**В. В. Адамчук, доктор технічних наук, академік НААН
В. В. Братішко, кандидат технічних наук
Національний науковий центр «Інститут механізації та
електрифікації сільського господарства»
e-mail: nnc-imesg@ukr.net**

Анотація. Метою статті є підвищення ефективності кормовиробництва шляхом теоретичного та експериментального обґрунтування науково-технічних основ проектування гвинтових грануляторів кормів з гвинтами, параметри яких змінюються за їх довжиною. Теоретичні дослідження здійснювались шляхом аналізу взаємодії робочих органів гранулятора з технологічним матеріалом із застосуванням методів теоретичної механіки та механіки

© В. В. Адамчук, В. В. Братішко, 2016

суцільного середовища, диференціальних та інтегральних обчислень, математичного моделювання. Експериментальні дослідження виконувались у лабораторних та виробничих умовах на основі планування багатofакторних експериментів. Аналітичні розрахунки й аналіз експериментальних даних здійснювались з використанням відповідного програмного забезпечення. В роботі розглянуто рух елементарного об'єму кормової сировини в розгортці каналу гвинта гранулятора кормів. Запропоновано умову приведення гвинтів з каналами поширених форм до ідеалізованої моделі гвинта з каналом прямокутної форми. Встановлено вплив конструкційно-режимних параметрів гранулятора та фізико-механічних властивостей кормової сировини на основні показники його роботи. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень було створено науково-технічні основи проектування гвинтових грануляторів кормів з гвинтами, параметри яких змінюються за їх довжиною. В загальному вигляді були отримані вирази тиску в каналі гвинта гранулятора, продуктивності, витрат потужності та крутного моменту на привод гвинта гранулятора. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність отриманих виразів. Знайдено вираз оптимальної інтенсивності зміни геометричних параметрів гвинта.

Ключові слова: *гранулятор, продуктивність, енергоємність, оптимізація, кормосуміш*

Постановка проблеми. Одним із наріжних завдань Державних цільових програм розвитку українського села, а також Стратегії розвитку тваринництва України до 2020 року [1] є забезпечення продовольчої безпеки країни шляхом збільшення виробництва продукції тваринництва, зокрема м'яса, молока та яєць, до досягнення науково обґрунтованих норм споживання харчових продуктів та підтримки експортного потенціалу.

Ефективне ведення галузі тваринництва неможливе без забезпечення тварин якісними збалансованими кормами за конкурентною ціною та у потрібній кількості. Основними з негативних чинників, що стримують розвиток тваринництва в Україні, є низький рівень забезпеченості тварин комбікормами, який не перевищує 30% від їх потреби, а також значний дефіцит білка в раціонах тварин.

Наслідком цього є незадовільний рівень реалізації генетичного потенціалу тварин, який не перевищує у свинарстві 48%, у виробництві молока – 53%, у виробництві яловичини – 54%. З огляду на це, основним шляхом збільшення виробництва продукції тваринництва має стати, поряд зі збільшенням чисельності тварин

та птиці, забезпечення реалізації генетичного потенціалу наявного поголів'я на основі підвищення ефективності використання кормів.

Аналіз останніх досліджень. Світові тенденції свідчать, що запорукою успішного ведення галузі є запровадження годівлі тварин однотипними раціонами протягом цілого року, яке запобігає появі кормового стресу та зниженню продуктивності тварин. Окрім того, ефективність використання кормів збільшується при згодовуванні їх у вигляді кормосумішей. Затрати на приготування кормосумішей не перевищують 5% витрат виробництва, але забезпечують підвищення продуктивності тварин на 9-17% [2]. Проте відомо, що при годівлі тварин кормосумішами спостерігається вибіркоче поїдання компонентів корму [3]. Уникнення цього явища можливе шляхом згодовування тваринам збалансованого комбікорму у вигляді кормових гранул або брикетів.

Відгодівельне поголів'я великої рогатої худоби, свині та птиця всіх груп можуть отримувати до 100% гранульованих повнораціонних кормів, а для молочних корів та племінних телиць ця частка може становити 50-60% раціону [4]. Світові тенденції свідчать про зростання частки кормів, що згодовуються у вигляді кормових гранул. Наприклад, у Нідерландах частка гранульованих кормів сягає 86%, зокрема – 93% при відгодівлі свиней, 54% – у птахівництві. А при відгодівлі ВРХ майже 100% кормів згодовуються у брикетах та гранулах.

Згодовування комбікормів у вигляді гранул дозволяє уникнути вибіркового поїдання кормів та забезпечити збалансованість раціону. Для підвищення ефективності споживання гранульованого корму доцільно ще вводити до його вмісту відповідно до зоотехнічних вимог грубі корми, зокрема сіно, що дозволить покращити фізіологічний стан травної системи тварин, підвищити ефективність використання корму та збільшити частку білку в раціонах шляхом використання сіна бобових трав.

Серед пресів різних типів – вальцевих, вальцево-матричних, штемпельних та гвинтових – найбільш придатними для приготування кормових гранул з вмістом сінної січки є гвинтові преси. За даними низки дослідників [6, 7] для підвищення ефективності технологічного впливу на матеріал гвинтовими робочими органами застосовують гвинти різного конструкційного виконання. З огляду на технологічність виготовлення та якість виконання робочого процесу, найбільш ефективними для приготування повнораціонних гранульованих кормів є гранулятори з циліндричним корпусом (робочою камерою) та гвинтом, геометричні параметри якого змінюються за його довжиною. Обґрунтуванню параметрів таких грануляторів і присвячена ця робота.

Мета досліджень. Підвищення ефективності кормовиробництва шляхом теоретичного та експериментального обґрунтування науково-технічних основ проектування гвинтових грануляторів кормів з гвинтами, параметри яких змінюються за їх довжиною.

Результати досліджень. Теоретичні дослідження здійснювались шляхом аналізу взаємодії робочих органів гранулятора з технологічним матеріалом із застосуванням методів теоретичної механіки та механіки суцільного середовища, диференціальних та інтегральних обчислень, математичного моделювання. Експериментальні дослідження виконувались у лабораторних та виробничих умовах на основі планування багатофакторних експериментів. Аналітичні розрахунки й аналіз експериментальних даних здійснювались з використанням відповідного програмного забезпечення.

Найширше застосування у гвинтових грануляторах отримали гвинти з трапецієподібним перерізом каналу (рис. 1, а), окремим випадком яких є гвинти з каналом прямокутного перерізу.

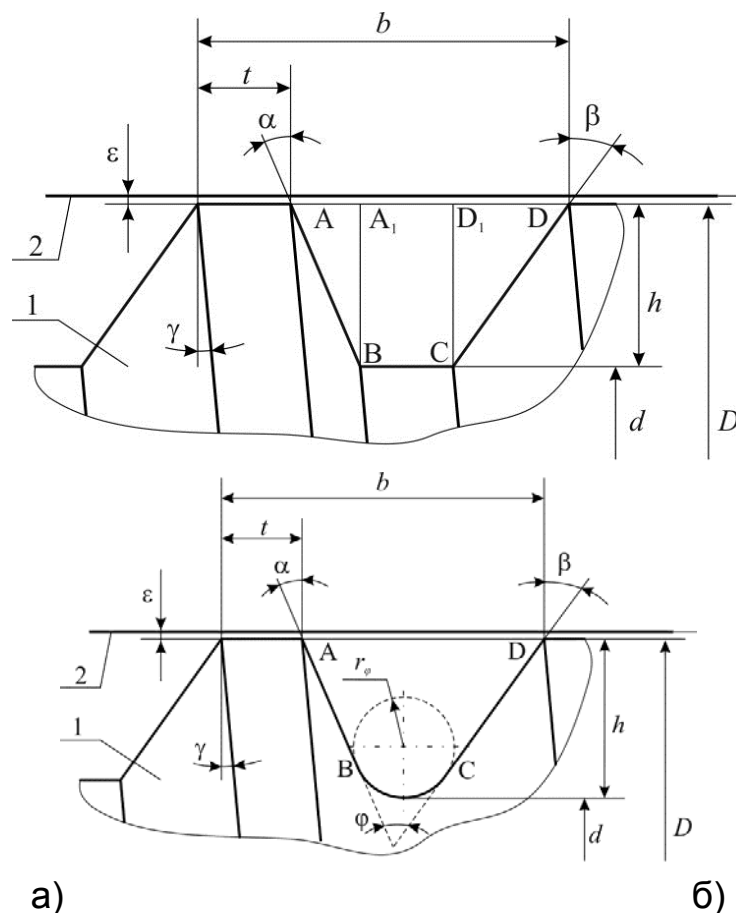


Рис. 1. Схема гвинта гранулятора з каналом трапецієподібного перерізу (а) та з основою каналу у вигляді дуги (б): 1 – гвинт, 2 – внутрішня стінка робочої камери.

Більшість інших конструкцій гвинтів можна представити у вигляді гвинтів, перерізи каналів яких містять в основі дугу та обмежені дотичними прямими до неї (рис. 1, б). Якщо геометричне моделювання гвинтів з трапецієподібним каналом не викликає складнощів, то для гвинтів з формою каналу, представленою на рис. 1, б, необхідним є узгодження параметрів радіусу кола твірної основи каналу гвинта r_ϕ та глибини гвинта h , які пов'язані між собою отриманою раніше залежністю [8]:

$$r_\phi = \frac{2[b-t-(h-2r_\phi)(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)]^2 \frac{\cos\alpha \cos\beta}{2\sin(\alpha + \beta)}}{b-t-(h-2r_\phi)(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta) + \frac{(b-t)(\cos\alpha + \cos\beta)}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{h-2r_\phi}{\cos\alpha} - \frac{h-2r_\phi}{\cos\beta}}, \quad (1)$$

де: h – глибина каналу гвинта, м; b – крок гвинта, м; t – ширина витка гвинта, м; α – кут нахилу передньої стінки витка гвинта, рад.; β – кут нахилу задньої стінки витка гвинта, рад.

Переважає більшість вчених в процесі виконання теоретичних досліджень робочих процесів гвинтових машин використовує геометричну модель у вигляді розгортки гвинта з прямокутним перерізом каналу шириною W та глибиною H . Використання такої ідеалізованої геометричної моделі обумовлено широким застосуванням методів механіки суцільного середовища для дослідження робочих процесів гвинтових пресів та, відповідно, можливістю отримання математичних моделей робочого процесу в загальному вигляді.

За нашим припущенням, використання такої ідеалізованої геометричної моделі каналу гвинта для аналізу процесів роботи гвинтів з каналами іншої форми буде можливе за умови, яку можна записати у вигляді системи рівнянь (2), тобто рівності, відповідно, площ перерізів каналів гвинтів F та співвідношень периметрів перерізів каналів гвинтів L (відрізок ABCD) та відповідних відрізків AD перерізів робочої камери (рис. 1):

$$\begin{cases} WH = F, \\ \frac{W}{2H+W} = \frac{b-t}{L}. \end{cases} \quad (2)$$

Розв'язання системи (2) дозволяє отримати залежності для визначення ширини та глибини прямокутного каналу гвинта, який би за показниками площі перерізу каналу та співвідношення периметрів перерізів каналу гвинта та робочої камери відповідав би гвинтам з каналами іншої форми.

Відомо, що підвищити ефективність процесу гранулювання можливо за рахунок використання гвинтів, геометричні параметри каналів яких змінюються за їх довжиною [9]. Спосіб виготовлення таких деталей, що полягає в суміщенні постійного руху заготовки

або інструмента з додатковим рухом, кількість якого задається окремо, дозволяє створювати гвинти, ширина та глибина каналів яких змінюється пропорційно до їх довжини. Для аналізу інтенсивності зміни геометричних параметрів каналів таких гвинтів нами було запропоновано комплекс безрозмірних показників [10]:

$$M_S = \frac{\partial S}{\partial l} L_{(l=0)}^{-1}, \quad (3)$$

$$M_V = \sqrt{\frac{\partial V}{\partial l} F_{(l=0)}^{-1}}, \quad (4)$$

$$M_F = \frac{\partial F}{\partial l} L_{(l=0)}^{-1}, \quad (5)$$

$$M_L = \nabla L = \frac{\partial L}{\partial l}, \quad (6)$$

де: S – площа поверхні каналу гвинта, м^2 ; V – об'єм каналу гвинта, м^3 ; l – довжина гвинта, м .

Залежності (3)–(6) за фізичним змістом є масштабними коефіцієнтами, які, з деякими припущеннями, можна назвати критеріями геометричної подібності гвинтів. Тобто, при пропорційній зміні геометричних параметрів гвинтів значення цих показників залишаються постійними.

Порівняльний розрахунок значень критеріїв (3)–(6) показав, що різниця між розрахунковими значеннями критеріїв не перевищує 2,5% для гвинтів з каналами різної форми та відповідними гвинтами з каналами прямокутної форми, параметри яких були визначені за системою залежностей (2).

Шляхом аналізу руху елемента об'єму кормосуміші у розгортці каналу гвинта гранулятора отримали вираз зміни тиску для гвинта зі змінними геометричними параметрами [11]:

$$p = p_m \text{Exp} \left[\frac{k_p \mu a'_0}{k_H k_W} \left(e^{\frac{kH_0}{k_H}} (f_b + f_s) k_W \left[Ei \left(kl_{\max} - \frac{kH_0}{k_H} \right) - Ei \left(kl - \frac{kH_0}{k_H} \right) \right] + 2e^{\frac{kW_0}{k_W}} f_s k_H \left[Ei \left(kl_{\max} - \frac{kW_0}{k_W} \right) - Ei \left(kl - \frac{kW_0}{k_W} \right) \right] \right) \right], \quad (7)$$

де: p_m – опір, створюваний матрицею гранулятора, Па; k_p – деякий коефіцієнт що враховує фізико-механічні властивості сировини та конструкційно-режимні параметри робочих органів; k_H , k_W – відповідно, коефіцієнти зміни ширини та глибини каналу гвинта за його довжиною для гвинта з каналом прямокутної форми; H_0 , W_0 – відповідно, початкові значення ширини та висоти каналу гвинта прямокутної форми, м ; f_b , f_s – коефіцієнти тертя кормосуміші, відповідно, по матеріалу робочої камери та гвинта гранулятора; μ –

коефіцієнт бічного тиску; l та l_{max} – відповідно, поточна та загальна довжина гвинта, м; Ei – інтегральна показникова функція вигляду

$$Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt; \quad k = \frac{1}{2l} \ln \left[\left(\frac{D - H_0 + k_H l}{W_0 - k_W l + t} \right)^2 + \frac{1}{\pi^2} \right] / \left[\left(\frac{D - H_0}{W_0 + t} \right)^2 + \frac{1}{\pi^2} \right]; \quad a'_0 = \pi \sqrt{\left(\frac{D - H_0}{W_0 + t} \right)^2 + \frac{1}{\pi^2}}.$$

Проведені дослідження [12] руху пластифікованої кормосуміші в каналі гвинта дозволили знайти вираз продуктивності гранулятора:

$$Q = \frac{\pi D n (W_0 - k_W l) (H_0 - k_H l)}{2 \sqrt{1 + \frac{(W_0 - k_W l - t)^2}{\pi^2 D^2}}} + \frac{(W_0 - k_W l) (H_0 - k_H l)^3}{12 \eta} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (8)$$

де: η – в'язкість, Па·с; n – частота обертання гвинта, с⁻¹; $\partial p / \partial z$ – градієнт тиску за довжиною каналу гвинта, Па/м.

З аналізу виразу (8), можемо зробити висновок про наявність деяких оптимальних значень параметрів глибини каналу H_0 , коефіцієнту зміни глибини каналу k_H та довжини гвинта l . Прирівнявши до нуля часткові похідні функції продуктивності (8) за відповідними аргументами знайдемо вирази оптимальної початкової глибини каналу гвинта [13]:

$$H_0^{opt} = k_H l + \frac{\pi \sqrt{2 D n \eta}}{\sqrt{\frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{\pi^2 D^2 + (W_0 - k_W l - t)^2}{D^2} \right)^{\frac{1}{4}}}}, \quad (9)$$

оптимального значення коефіцієнту зміни глибини каналу гвинта:

$$k_H^{opt} = \frac{1}{l} \left[H_0 - \frac{\pi \sqrt{2 D n \eta}}{\sqrt{\frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{\pi^2 D^2 + (W_0 - k_W l - t)^2}{D^2} \right)^{\frac{1}{4}}}} \right]. \quad (10)$$

Також нами були отримані залежності витрат потужності [14] на привод гранулятора (без урахування енергоємності пристрою для відрізання гранул):

$$N = 2 \pi l \mu p_m \int_0^{l_{max}} \int_0^{H_0 - k_H l} e^{-A_p \left(\frac{l_{max}}{l} - 1 \right)} \frac{\pi (D - H_0 - k_H l) [k_W (D - H_0) - k_H (W_0 + t)]}{(W_0 - k_W l + t)^3 \sqrt{\frac{(D - H_0 - k_H l)^2}{(W_0 - k_W l + t)^2} + \frac{1}{\pi^2}}} dy dl, \quad (11)$$

та крутного моменту на привод гвинта гранулятора кормів [15]:

$$M = \mu p_m \int_0^{l_{max}} \int_0^{H_0 - k_H l} e^{-A_p \left(\frac{l_{max}}{l} - 1 \right)} \frac{-k_W l_{max} + 2(W_0 + t)}{y \sqrt{16 \pi^2 + \frac{(k_W l_{max} - 2(W_0 + t))^2}{y^2}}} \times \left(\frac{D}{2} - y \right) \frac{\pi (D - H_0 - k_H l) [k_W (D - H_0) - k_H (W_0 + t)]}{(W_0 - k_W l + t)^3 \sqrt{\frac{(D - H_0 - k_H l)^2}{(W_0 - k_W l + t)^2} + \frac{1}{\pi^2}}} dy dl, \quad (12)$$

де: y – поточна глибина каналу гвинта, м.

Для проведення експериментальних досліджень процесу гранулювання було створено експериментальний зразок гранулятора кормів (рис. 2).



Рис. 2. Експериментальний зразок гвинтового гранулятора кормів.

Для керування досліджуваним процесом гранулювання та фіксації витрат енергії було змонтовано стенд, який складався з електронного імпульсного лічильника електричної енергії НІК 2301 АП2, пускової та захисної апаратури, а також електронно-механічного таймера з лічильником імпульсів. Оберти гвинта гранулятора змінювали за допомогою перетворювача частоти електричного струму DELTA VFD037EL43A.

Для дослідження впливу геометричних параметрів робочих органів на показники процесу гранулювання використовували гвинти з різною інтенсивністю зміни розмірів каналу за довжиною (рис. 3, а) та матриці з різною кількістю отворів різного діаметру (рис. 3, б).



Рис. 3. Гвинти з різною інтенсивністю зміни розмірів каналу за довжиною (а) та матриці з різною кількістю отворів які мали різні діаметри (б).

Метою експериментальних досліджень процесу гранулювання зерно-стеблових кормосумішей було встановлення впливу конструкційних, режимних та технологічних параметрів процесу роботи гвинтового гранулятора кормів на показники якості та енергоємності процесу гранулювання. Вміст грубих кормів в кожній порції для всіх дослідів складав 25% за масою при початковій вологості. При цьому початкова вологість сіна становила 17,8%, ячменю – 11,7%. Середньозважена довжина часточок сіна становила 8,2 мм, модуль помелу ячменю – 1,1 мм. Дослідження проводили із знятим ножем пристрою для обрізання гранул.

Попередньо проведені теоретичні дослідження дозволили встановити, що серед факторів, які впливають на зміну конструкційних параметрів гвинтів грануляторів і входять до складу всіх без виключення критеріїв геометричної подібності гвинтів та мають оптимальні значення для функції продуктивності можна виділити коефіцієнт зміни глибини каналу гвинта за його довжиною k_H . З огляду на це, в якості досліджуваних факторів були прийняті: вологість кормосуміші w ; коефіцієнт зміни глибини каналу гвинта за його довжиною k_H ; діаметр отворів матриці d_m ; частота обертання гвинта гранулятора n . З метою забезпечення відповідності параметрів фізико-механічного впливу на кормосуміш при виробництві гранул різних діаметрів нами було отримано вираз (13), який дозволяє узгодити між собою конструкційні параметри змінних матриць, а саме – кількість отворів, їх довжини та діаметр [16]:

$$j_1 \frac{d_{m1}^4}{l_{m1}} e^{4\mu f \frac{l_{m1}}{d_{m1}}} = j_2 \frac{d_{m2}^4}{l_{m2}} e^{4\mu f \frac{l_{m2}}{d_{m2}}}, \quad (13)$$

де j – кількість отворів матриці, шт.; f – коефіцієнт тертя по стінках каналу матриці; l_m – довжина отвору матриці (товщина матриці), м; μ – коефіцієнт бічного тиску.

В залежності (13) цифрами 1 та 2 позначені матриці, що використовуються для отримання корму з різним діаметром гранул.

Перелік досліджуваних факторів та рівні їх варіювання наведено у табл. 1. В якості досліджуваних критеріїв були прийняті питомі витрати енергії на процес гранулювання E та продуктивність гранулятора Q .

1. Досліджувані фактори та рівні їх варіювання

Рівні варіювання факторів	Фактори			
	$w, \%$	k_H	$d_m, \text{мм}$	$n, \text{об/хв.}$
Верхній рівень (+)	35	0,072	12,0	40
Основний рівень (0)	25	0,064	8,5	70
Нижній рівень (-)	15	0,056	5,0	100
Інтервал варіювання	10	0,008	3,5	30

Для питомої енергоємності E модель мала вигляд (рис. 4):

$$E = -10,6943 + 15,53w - 0,19099w^2 - 124,409wk_H + 314,811k_Hd_m - 1,67264d_m^2. \quad (14)$$

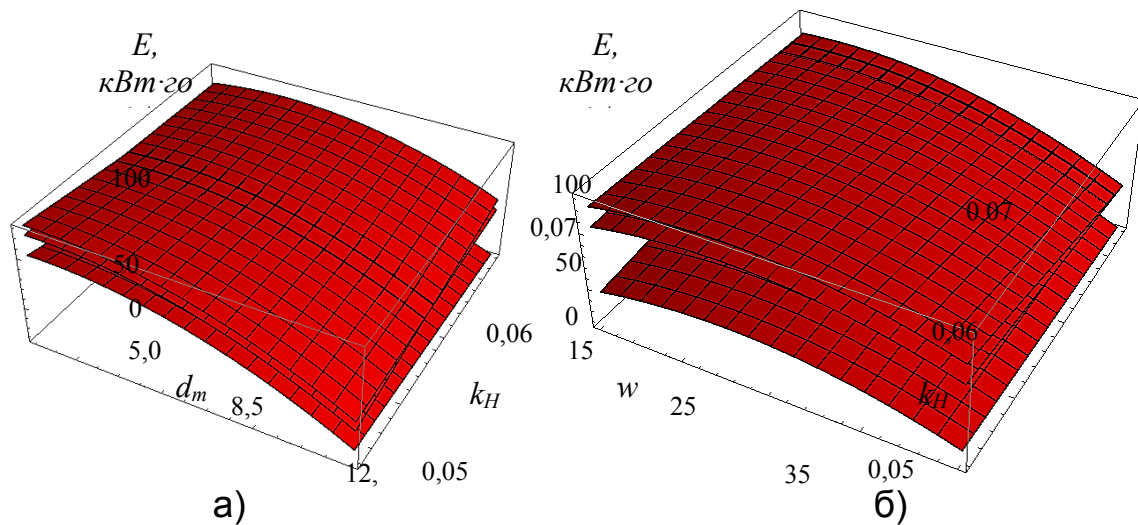


Рис. 4. Вплив вологості кормосуміші w , коефіцієнту зміни глибини каналу гвинта за його довжиною k_H та діаметру отворів матриці d_m на питому енергоємність процесу гранулювання E при фіксації параметрів вологості кормосуміші (а), та діаметра отворів матриці (б) на верхньому, нульовому та нижньому рівнях.

Залежність (14) є адекватною на 90% рівні довірчої вірогідності (значення критерію Фішера $F = 11,3931$; ймовірність F -критерію $P = 0,999911$), всі коефіцієнти моделі є значущими на рівні довірчої вірогідності не менше 90%. Для продуктивності Q отримане рівняння регресії мало вигляд (рис. 5):

$$Q = 58,278 - 4,42935w + 0,0418352w^2 + 38,3826wk_H - 16333,5k_H^2 + 27,2488k_Hd_m + 12,3533k_Hn - 0,00465103d_m^2. \quad (15)$$

З графічного аналізу наведеної залежності (рис. 5) можна встановити, що продуктивність гранулювання має оптимум (максимум) для деяких значень коефіцієнту зміни глибини каналу гвинта k_H , за якого досягається максимум продуктивності гранулятора. Для оптимізації функції продуктивності за параметром коефіцієнта зміни глибини каналу гвинта k_H прирівняємо до нуля продиференційоване за аргументом k_H рівняння (15), звідки вираз для визначення оптимальних значень коефіцієнта зміни глибини каналу гвинта запишеться як:

$$k_H = \frac{1}{32667} (38,3826 w + 27,2488 d_m + 12,3533 n). \quad (16)$$

Співставлення теоретичної (10) та експериментальної (16) залежності коефіцієнту зміни глибини каналу гвинта k_H наведено на рис. 6.

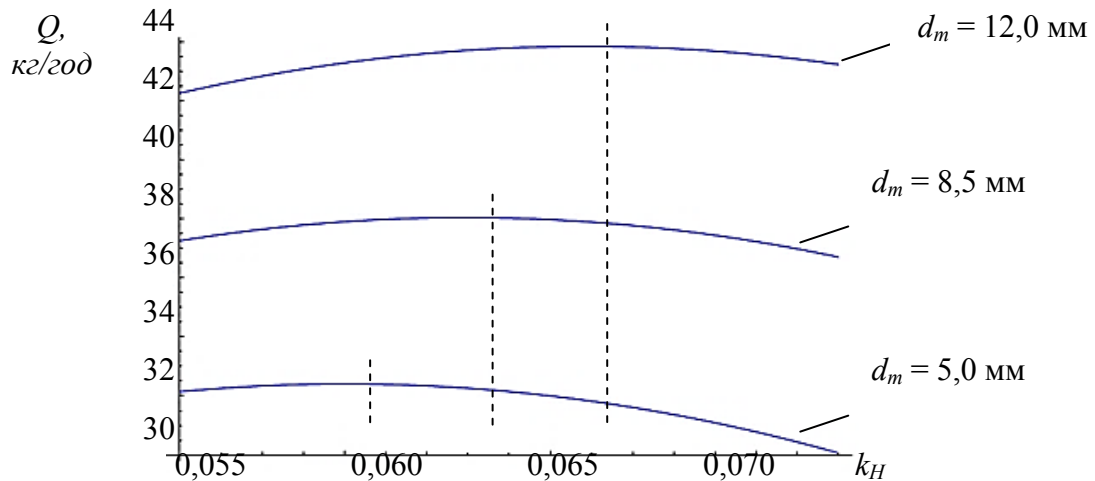


Рис. 5. Вплив коефіцієнту зміни глибини каналу гвинта k_H на продуктивність гвинтового гранулятора кормів Q при фіксації інших факторів на нульових рівнях.

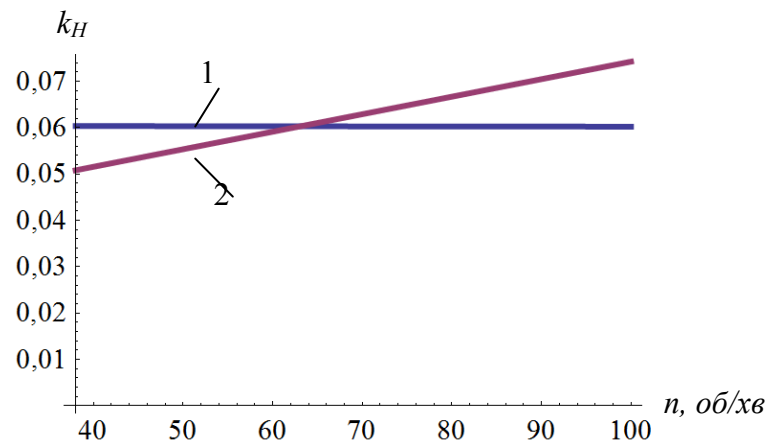


Рис. 6. Залежність коефіцієнту зміни глибини каналу гвинта k_H від частоти обертання гвинта гранулятора n при $d = 80$ мм, $l = 200$ мм, $t = 5$ мм, $k_W = 0,0488$, $H_0 = 12,12$ мм, $W_0 = 16,78$ мм, $\eta = 4$ Па·с, $w = 22\%$, $d_m = 8,5$ мм, $\partial p/\partial z = 5$ МПа/м; 1, 2 – відповідно, теоретична і експериментальна залежності.

Як видно, в області номінальних значень частоти обертання гвинта гранулятора (близько 60 хв^{-1}) різниця між теоретичними та експериментальними значеннями наближається до нуля, що свідчить про адекватність отриманих залежностей. При цьому найвища продуктивність гвинта гранулятора відповідає значенням коефіцієнту $k_H = 0,054-0,058$. Характер розходження між теоретичними та експериментальними значеннями коефіцієнту k_H на рис. 6 пояснюється тим, що для спрощення розрахунку коефіцієнту за залежністю (10) припускали, що градієнт тиску є постійною величиною. Фактично ж, збільшення обертів гвинта призводить до зростання опору, створюваного матрицею гранулятора, та, відповідно, й значень градієнти тиску в каналі гвинта $\partial p/\partial z$.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено комплект конструкторської документації та створено дослідний зразок гвинтового гранулятора кормів ГК, який успішно пройшов виробничі випробування у ДП «ДГ «Оленівське» ННЦ «ІМЕСГ». В результаті проведених виробничих випробувань було встановлено, що гвинтовий гранулятор кормів надійно виконує робочий процес, забезпечуючи виготовлення повнораціональних кормових гранул, які відповідають вимогам діючих стандартів. Продуктивність роботи гранулятора сягала 38 кг/год., а максимальна кришимість гранул не перевищувала 6%.

Складовими економічної ефективності є скорочення втрат корму на 3-5%, обумовлене зменшенням кришимості гранул у порівнянні з грануляторами вальцево-матричного типу, а також зменшення питомих витрат енергії до 5-7% у порівнянні з гвинтовими пресами інших конструкцій. Як базові технічні засоби при економічній оцінці приймали вальцево-матричний гранулятор ГКМ-100 та гвинтовий гранулятор ГУК-50. Розрахунки показали, що впровадження розробленого гвинтового гранулятора ГК у виробництво дозволяє отримати економічний ефект на рівні 41,91 грн./т у порівнянні з гвинтовими грануляторами та 487,39 грн./т у порівнянні з грануляторами вальцево-матричного типу.

Висновок. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень було створено науково-технічні основи проектування гвинтових грануляторів кормів з гвинтами, параметри яких змінюються за їх довжиною. В загальному вигляді отримані аналітичні залежності для визначення тиску в каналі гвинта гранулятора, продуктивності, витрат потужності та крутного моменту на привод гвинта гранулятора. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність отриманих теоретичних залежностей процесу гранулювання кормів. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень отримано вираз коефіцієнту зміни глибини каналу гвинта k_H , що дозволяє забезпечити найвищу продуктивність гранулятора.

Список літератури

1. Гадзало, Я. М. Стратегія розвитку тваринництва України до 2020 року [Текст] / Я. М. Гадзало, М. І. Бащенко, О. М. Жукорський та ін. – К.: Аграр. наука, 2016. – 104 с.
2. Зубець, М. В. Актуальні проблеми технічної політики в аграрному секторі України [Текст] / М. В. Зубець, Я. С. Гуков, М. І. Грицишин. – К.: ДІА, 2007. – 80 с.
3. Бабенко, О. Балансування годівлі корів за сухою речовиною [Текст] / О. Бабенко // Пропозиція. – 2012. – № 12 (210). – С. 2–6.
4. Мельников, С. В. Производство травяной муки в гранулах [Текст] / С. В. Мельников, Г. Я. Фарбман. – Л.: Лениздат, 1975. – 112 с.

5. Шаршунов, В. А. Машины и оборудование для производства комбикормов [Текст] / В. А. Шаршунов, А. В. Червяков, С. А. Бортник, Ю. А. Пономаренко. – Мн.: Экоперспектива, 2005. – 487 с.
6. Bruin, S. A review of fundamental and engineering aspects of extrusion of biopolymers in a single screw extruder [Text] / S. Bruin, D.J. van Zuilichem, W. Stolp // J. Food Process Eng. – 1978. – Vol. 2. – P. 1–37.
7. *Extrusion-Cooking Techniques: Applications, Theory and Sustainability* [Text] / Edited by Leszek Moscicki. – Weinheim: WILEY-VCH, 2011. – 234 p.
8. Братишко, В. В. Дослідження геометричних параметрів гвинта гранулятора кормів з основою каналу у вигляді частини кола [Текст] / В. В. Братишко // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Технічні системи і технології тваринництва». – 2013. – Вип. № 132. – С. 415–420.
9. *Food Science and Technology* [Text] / Edited by Geoffrey Campbell-Platt. – Singapore: John Wiley & Sons, Ltd., 2009. – 520 p.
10. Братишко, В. В. Моделирование геометрических параметров винтовых грануляторов кормов [Текст] / В. В. Братишко // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2014. – № 1(13). – С. 133–139.
11. Братишко, В. В. Аналіз тиску в каналі гвинта гранулятора кормів зі змінними геометричними параметрами [Текст] / В. В. Братишко // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 2013. – Вип. 98. Т 2. – С. 74–84.
12. Братишко, В. В. Аналіз продуктивності гвинтового гранулятора кормів зі змінними геометричними параметрами гвинта за його довжиною [Текст] / В. В. Братишко // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин» – 2013. – Вип. 43, ч. II. – С. 43–49.
13. Братишко, В. Оптимізація конструкційних параметрів гвинта гранулятора кормів [Текст] / В. Братишко // Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження. – 2014. – № 18. – С. 128–135.
14. Братишко, В. В. Витрати потужності на привод гвинта гранулятора кормів [Текст] / В. В. Братишко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212/2. – С. 53–58.
15. Братишко, В. В. Момент на валу гвинта гранулятора зі змінними геометричними параметрами гвинта [Текст] / В. В. Братишко // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2013. – Вип. 3, Т. 1. – С. 20–25 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/nvtdau>.
16. Братишко, В. В. Узгодження конструкційних параметрів матриць гвинтових грануляторів кормів за тиском та пропускною здатністю [Текст] / В. В. Братишко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2014. – Вип. 27. – С. 187–191.

References

1. Hadzalo, Ya. M., Bashchenko, M. I., Zhukorskyi, O. M. (2016). *Stratehiia rozvytku tvarynnytstva Ukrainy do 2020 roku* [Livestock Development Strategy of Ukraine till 2020]. Kyiv, Ukraine: Ahrar. nauka, 104.
2. Zubets, M. V., Hukov, Ya. S., Hrytsyshyn, M. I. (2007). *Aktualni problemy tekhnichnoi polityky v ahrarnomu sektori Ukrainy* [Actual problems of technical policy in the agrarian sector of Ukraine]. Kyiv, Ukraine: DIA, 80.

3. Babenko, O. (2012). Balansuvannia hodivli koriv za sukhoiu rechovynoiu [Balancing feeding cows dry matter]. *Propozyciia*, 12 (210), 2–6.
4. Melnikov, S. V., Farbman, G. Ja. (1975). Proizvodstvo travjanoj muki v granulah [Production of herbal flour granules]. Leningrad, USSR: Lenizdat, 112.
5. Sharshunov, V. A., Chervjakov, A. V., Bortnik, S. A., Ponomarenko, Ju. A. (2005). Mashiny i oborudovanie dlja proizvodstva kombikormov [Machinery and equipment for the production of animal feed]. Minsk, Belarus: Jekoperspektiva, 487.
6. Bruin, S., van Zuilichem, D.J., Stolp, W. (1978). A review of fundamental and engineering aspects of extrusion of biopolymers in a single screw extruder. *J. Food Process Eng.*, 2, 1–37.
7. Moscicki, Leszek ed. (2011). *Extrusion-Cooking Techniques: Applications, Theory and Sustainability*. Weinheim: WILEY-VCH, 234.
8. Bratishko, V. V. (2013). Doslidzhennia heometrychnykh parametriv hvynta hranuliatora kormiv z osnovoju kanalu u vyhliadi chastyny kola [The study of geometrical parameters of pellet feed screw with the base of the channel in the form of a circle]. *Tekhnichni systemy i tekhnolohii tvarynnytstva*, 132, 415–420.
9. Campbell-Platt, Geoffrey ed. (2009). *Food Science and Technology*. Singapore: John Wiley & Sons, 520.
10. Bratishko, V. V. (2014). Modelirovanie geometricheskikh parametrov vintovykh granuljatorov kormov [Modelling of geometric parameters of pellet feed screw]. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mehanizacii zhivotnovodstva*, 1(13), 133-139.
11. Bratishko, V. V. (2013). Analiz tysku v kanali hvynta hranuliatora kormiv zi zminnymy heometrychnymy parametramy [Analysis of pressure in the feed pellet feed screw with variable geometric parameters]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, 98 (2), 74–84.
12. Bratishko, V. V. (2013). Analiz produktyvnosti hvyntovoho hranuliatora kormiv zi zminnymy heometrychnymy parametramy hvynta za yoho dovzhynoiu [Analysis of productivity pellet feed screw with variable screw geometrics for its length]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 43 (II), 43–49.
13. Bratishko, V. (2014). Optyimizatsiia konstruktsiinykh parametriv hvynta hranuliatora kormiv [Optimization of structural parameters of pellet feed screw]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarynnoho universytetu. Ahroinzhenerni doslidzhennia*, 18, 128–135.
14. Bratishko, V. V. (2015). Vytraty potuzhnosti na pryvod hvynta hranuliatora kormiv [Loss of power to drive the screw pellet feed]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Tekhnika ta enerhetyka APK*, 212/2, 53-58.
15. Bratishko, V. V. (2013). Moment na valu hvynta hranuliatora zi zminnymy heometrychnymy parametramy hvynta [The moment the pellet mill screw shaft with variable geometric parameters of the screw]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu*, 3 (1), 20–25. Available at: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/nvtdau>
16. Bratishko, V. V. (2014). Uzghodzhennia konstruktsiinykh parametriv matryts hvyntovykh hranuliatoriv kormiv za tyskom ta propusknoiu zdattistiu [Reconciliation of structural parameters of matrix pellet feed screw for pressure and throughput]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, 27, 187–191.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВОГО ГРАНУЛЯТОРА КОРМОВ

В. В. Адамчук, В. В. Братишко

Аннотация. Целью статьи являются повышение эффективности кормопроизводства путем теоретического и экспериментального обоснования научно-технических основ проектирования винтовых грануляторов кормов с винтами, параметры которых изменяются по их длине. Теоретические исследования осуществлялись путем анализа взаимодействия рабочих органов гранулятора с технологическим материалом с применением методов теоретической механики и механики сплошной среды, дифференциальных и интегральных вычислений, математического моделирования. Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных и производственных условиях на основе планирования многофакторных экспериментов. Аналитические расчеты и анализ экспериментальных данных осуществлялись с использованием соответствующего программного обеспечения. В статье рассмотрено движение элементарного объема кормового сырья в развертке канала винта гранулятора кормов. Предложено условие приведения винтов с каналами распространенных форм к идеализированной модели винта с каналом прямоугольной формы. Установлено влияние конструкционно-режимных параметров гранулятора и физико-механических свойств кормового сырья на основные показатели его работы. В результате теоретических и экспериментальных исследований были созданы научно-технические основы проектирования винтовых грануляторов кормов с винтами, параметры которых изменяются по их длине. В общем виде были получены выражения давления в канале винта гранулятора, производительности, затрат мощности и крутящего момента на привод винта гранулятора. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность полученных выражений. Найдено выражение оптимальной интенсивности изменения геометрических параметров винта.

Ключевые слова: *гранулятор, производительность, энергоемкость, оптимизация, кормосмеси*

RATIONALE FOR THE SCREW PELLET MILL PARAMETERS

V. V. Adamchuk, V. V. Bratishko

Abstract. The purpose of the article is to increase the efficiency of feed production by theoretical and experimental study of scientific and technical bases of the design of screw pellet feed with screws, the parameters of which vary along their length. Methods. Theoretical

studies were based on an analysis of the interaction of working bodies of means of technological materials using methods of theoretical mechanics and continuum mechanics, integral and differential calculations, mathematical modeling. Experimental studies conducted in laboratory and production environments and provide for planning multifactor experiments. Theoretical calculations and experimental data analysis was conducted using the application software. Results. Considered traffic volume element feed materials in pellet screw channel scan feed. A condition for adjustment screws channels to common forms idealized model screw channel rectangular shape. The influence of structurally-granulator operational parameters and physical and mechanical properties of the feed materials on the basic parameters of its work. Conclusions. As a result of theoretical and experimental studies were scientific-technical design principles pellet feed screw screws, parameters which vary in their length. In general, the received expressions pressure in the feed screw presses, productivity, cost of power and torque to the drive screw granulator. Experimental studies have confirmed the adequacy expressions. Found optimal expression intensity changes of geometrical parameters of screw.

Keywords: pellet mill, performance, power consumption, optimization, forage mixture

УДК 631.312.4.072.3

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ РУХУ ОРНОГО АГРЕГАТУ У ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ПЛОЩИНІ

О. Д. Кістечок, аспірант*

**В. Т. Надикто, доктор технічних наук, член-кореспондент НААН
Таврійський державний агротехнологічний університет
e-mail: imesh@zp.ukrtel.net**

Анотація. Викладено результати аналізу стійкості руху орного агрегату у горизонтальній площині за умови використання фронтального плуга, навішеного на трактор серії ХТЗ-160. Для оцінювання траєкторних показників його руху вказаний енергетичний засіб був обладнаний датчиками повороту керованих коліс і гіропівкомпасом.

Дослідженнями встановлено, що орний МТА за схемою «2+4» (тобто 2 корпуси плуга спереду і 4 – ззаду) має задовільні

*Науковий керівник – доктор технічних наук В. Т. Надикто

© О. Д. Кістечок, В. Т. Надикто, 2016