

Volodymyr Dudin, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Govorukha**, Prof., DSc.
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Justification of the Structural and Technological Parameters of the Belt-screw Mixer of Loose Fodder

The purpose of the work was to substantiate the operational parameters of the belt-screw mixer of bulk feed on the basis of experimental studies of the process.

As a result of experimental studies of the process of mixing loose feed with an experimental mixer, the following was established. With increasing time and rotation frequency, the homogeneity of the mixture increases and reaches a maximum of 97.8% at $n = 48 \text{ min}^{-1}$ and $t = 3.2 \text{ min}$. after which there is a slight decrease. The nature of the process is close to the typical kinetics of mixing loose materials. The energy consumption for the process is non-linear in nature, while the optimum (the smallest value) is located at the point corresponding to the value of the rotation frequency of 40.5 min^{-1} , and not at the minimum n . At minimum k , energy consumption for the process is 2.25 kW/cycle , and at maximum – 3.66 kW/cycle . The mixing time will be different for different contents of the smallest component and is within $2.9\text{--}3.56 \text{ min}$.

Based on the obtained data, the rational parameters of the mixer under development were established.
feed, mixing, loose components, experiment, parameters, quality of mixing, energy consumption, rotation frequency, duration of the process

Одержано (Received) 18.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 25.12.2023

УДК 631.363:636.087

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.121-130>

Е. Б. Алієв, ст.досл., проф., д-р техн. наук, **В. Ю. Дудін**, доц., канд. техн. наук,
М. О. Лінко, асп.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: aliev@meta.ua

Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів

Застосування експандерів є необхідним у виробництві кормів і харчових продуктів, оскільки ці технічні засоби дозволяють покращити якість і поживні характеристики кінцевого продукту. Завдяки їх високій продуктивності і можливості регулювання тиску, експандери забезпечують ефективну обробку матеріалів, зберігаючи при цьому їх корисні властивості. Отже, оптимізація технологічних параметрів для формування експандатів залишається актуальною задачею в інжинірингу експандерів. Метою досліджень є обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів малогабаритного експандера кормів експериментальним шляхом. В результаті експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів встановлені залежності зміни продуктивності експандера Q , його споживаної потужності N , питомої енергоємності процесу експандування q і щільності отриманих експандатів ρ від вологості комбікорму W , зазору між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n . Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень при якому спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування $q = 30,7 \text{ кВт-год/т}$ встановлено, що $W = 27,1 \%$, $\delta_c = 3,7 \text{ мм}$, $n = 54,4 \text{ об/хв}$. При цьому продуктивність складала $Q = 28,8 \text{ кг/год}$, споживана потужність $N = 879 \text{ Вт}$, а щільність експандатів $\rho = 336 \text{ кг/м}^3$.

корма, експандер, експеримент, параметри, продуктивність, енергоємність, вологість, частота обертання, зазор, конус

© Е.Б. Алієв, В.Ю. Дудін, М. О. Лінко, 2023

Постановка проблеми. Сьогодні значна частина рослинної сировини, яка використовується у виробництві харчових продуктів і кормів, піддається експандуванню [1, 2]. Перевагою цієї технології є радикальна зміна структури сировини, її фізичних властивостей, поживної цінності, а також хімічного складу в процесі обробки [3]. Крім того, експандування надає можливість широко змінювати властивості готового продукту шляхом варіювання параметрами процесу [4, 5].

Експандуванню і екструзії піддається різноманітний спектр рослинної сировини: зерно, бобові, фрукти, овочі, коренеплоди, листя та стебла рослин, а також їхні суміші [6]. Важливою перевагою технології експандування і екструзії є можливість переробки відходів харчової промисловості і агропромислового виробництва, таких як віджатки плодів, шкірки фруктів, макуха, жом тощо, з метою їх подальшого використання у складі харчових продуктів або кормів [2, 3, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для здійснення процесу експандування і екструзії використовують одногвинтові та двогвинтові екструдери [4]. Незважаючи на велике різноманіття моделей, їх конструкція схожа та включає бункер для завантаження сировини, гвинт з винтовою спіраллю, що обертається у нерухомому циліндричному корпусі, у кінці якого є отвір (фільєра) для виходу експандату [3, 8]. Додатково до конструкції екструдера або експандера можуть включати електричні обігрівачі корпусу для підвищення температури процесу та пристрої для подачі в корпус води чи пари для зволоження сировини [9]. Одногвинтові пристрої зазвичай використовують для обробки однокомпонентних або багатокомпонентних продуктів, а двогвинтові – для отримання складних багатокомпонентних продуктів [10].

Зазвичай у екструдер або експандер завантажують попередньо підготовлену рослинну сировину або суміш сировинних компонентів за допомогою методів подрібнення, зволоження та кондиціонування [11]. Сировина, яку переміщує гвинт по корпусу під дією високого тиску та температури, а також різкого перепаду тиску при виході з фільєри, змінює свою структуру та властивості [5, 12]. В якості змінних входних параметрів, які змінюють хід процесу експандування (екструзії) та властивості готового експандату, зазвичай виступають швидкість подачі сировини в екструдер, частота обертання шнека, співвідношення діаметра та довжини шнека, температура екструзії, тиск та діаметр фільєри [4, 13]. Також значення мають початкові властивості сировини, такі як вологість, ступінь подрібнення, хімічний склад, жирність тощо [5, 14].

Під час процесу екструзії рослинна сировина зазнає цілого ряду фізико-хімічних змін та змін у поживній цінності [14]. Ці зміни включають окислення жирів, денатурацію білка, формування хрестових зв'язків між білками та іншими речовинами, желатинізацію та декстринізацію крохмалю, руйнування вітамінів та каротину, денатурацію ферментів, зміну структури (консистенції), кольору та запаху продукту [14, 15]. Ці зміни є результатом комплексного впливу на сировину зазначених вище змінних входних параметрів процесу екструзії або експандування [5, 6, 13].

Параметри процесу екструзії або експандування рослинної сировини змінюються з метою отримання продукту з необхідними властивостями та забезпечення мінімального зменшення поживної цінності продукту через руйнування корисних речовин [16].

Під час експандованого приготування кормів важливу роль відіграють фізико-технологічні аспекти, такі як теплопередача, масообмін, передача імпульсу, тиск та тривалість дії температури [17, 18]. Ці фактори мають значний вплив на властивості харчових продуктів і кормів і можуть суттєво впливати на якість кінцевого продукту. Тому належна регуляція і контроль цих параметрів є ключовими аспектами процесу експандованого приготування кормів.

Застосування експандерів є необхідним у виробництві кормів і харчових продуктів, оскільки ці технічні засоби дозволяють покращити якість і поживні характеристики кінцевого продукту. Завдяки їх високій продуктивності і можливості регулювання тиску, експандери забезпечують ефективну обробку матеріалів, зберігаючи при цьому їх корисні властивості.

Отже, оптимізація технологічних параметрів для формування експандатів залишається актуальною задачею в інжинірингу експандерів.

Постановка завдання. Метою досліджень є обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів малогабаритного експандера кормів експериментальним шляхом.

Виклад основного матеріалу. На початку досліджень готували зразки комбікорму відповідного гранулометричного складу з розміром часток 1,2–2,4 мм. В якості складових комбікорму, у співвідношенні 25 : 25 : 25 : 25 %, використовували зерно пшениці, ячменю, кукурудзи та соняшникову макуху, подрібнені за допомогою дискового подрібнювача, який дозволяє забезпечити вищу (біля 92 %), ніж молотковий, однорідність подрібнення [19]. Приготування комбікорму проводили за допомогою лабораторного спірального-гвинтового змішувача сипких матеріалів, який дозволяє отримувати суміші однорідністю 94–98 % [20].

Вихідну вологість (10 ± 2 %) зразків комбікорму змінювали шляхом додавання відповідної кількості води:

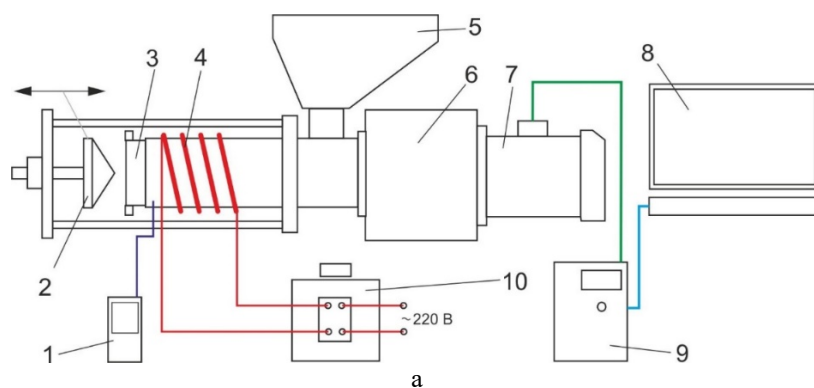
$$m_{\text{в}} = m_{\text{з}} \left(\frac{100 - W_0}{100 - W_{\text{н}}} - 1 \right), \quad (1)$$

де $m_{\text{в}}$, $m_{\text{з}}$ – маса води та зразка комбікорму відповідно, кг;

W_0 , $W_{\text{н}}$ – вихідна вологість та вологість, яку необхідно отримати, %.

На основі результатів теоретичних досліджень [21, 22] було розроблено та реалізовано експериментальний зразок експандера комбікормів, який став основою дослідної установки, приведеної на рис. 1.

Змінними факторами експериментальних досліджень були зазор між запираючим конусом та гайкою $\delta_{\text{с}}$ (1–5 мм), частота обертання гвинта n (30–60 об/хв) і вологість комбікорму W (20–30 %). Критерії оптимізації: споживана потужність N , продуктивність Q експериментального експандера і щільність отриманих експандатів ρ .





б

1 – цифровий термометр з термопарою FLUS ET-960; 2 – запираючий конус; 3 – гайка з роздільником потоку; 4 – повітряний ТЕН нагріву робочої камери; 5 – бункер завантаження; 6 – черв'ячний редуктор NMRV-63 (1:25); 7 – електродвигун AIP/5A180A4; 8 – ПЕОМ; 9 – частотний перетворювач HYUNDAI N700E; 10 – лабораторний автотрансформатор ЛАТР-1М; 11 – тахометр Venetech GM8905

Рисунок 1 – Схема (а) та загальний вигляд (б) дослідної установки

Джерело: розроблено авторами

Дослідження проведені за планом Бокса-Бенкіна ВВ₃ у триразовій повторності.

Відповідну частоту обертання гвинта встановлювали за допомогою частотного перетворювача Hyundai N700E та контролювали за допомогою тахометра Venetech GM8905. Відповідний зазор між запираючим конусом та гайкою встановлювали шляхом обертання гвинта, на якому встановлено конус, та контролювали за допомогою глибиноміра штангенциркуля ШЦ-150-0,1. Температуру в робочій камері підтримували на рівні 136 ± 2 °C за допомогою повітряного ТЕНу, ступінь нагріву якого регулювали зміною струму живлення лабораторним автотрансформатором ЛАТР-1М. Потужність приводу N знімали за допомогою частотного перетворювача Hyundai N700E з наступним поточним записом за допомогою персонального комп'ютера, на якому встановлено програмне забезпечення N700 HIMS. Продуктивність експандера Q визначали, виходячи з часу, затрачуваного на переробку однієї наважки, яка складала 1 кг. Затрачуваний час визначали за допомогою секундоміра. Питому енергоємність процесу q визначали як відношення затрачуваної потужності N до продуктивності Q . Щільність отриманих експандатів ρ визначалась з використанням методу гідростатичного зважування.

У відповідності до представленої методики проведені багатофакторні експериментальні дослідження процесу роботи малогабаритного експандера кормів. Загальний вигляд зразків отриманого продукту (експандатів) приведені на рис. 2.

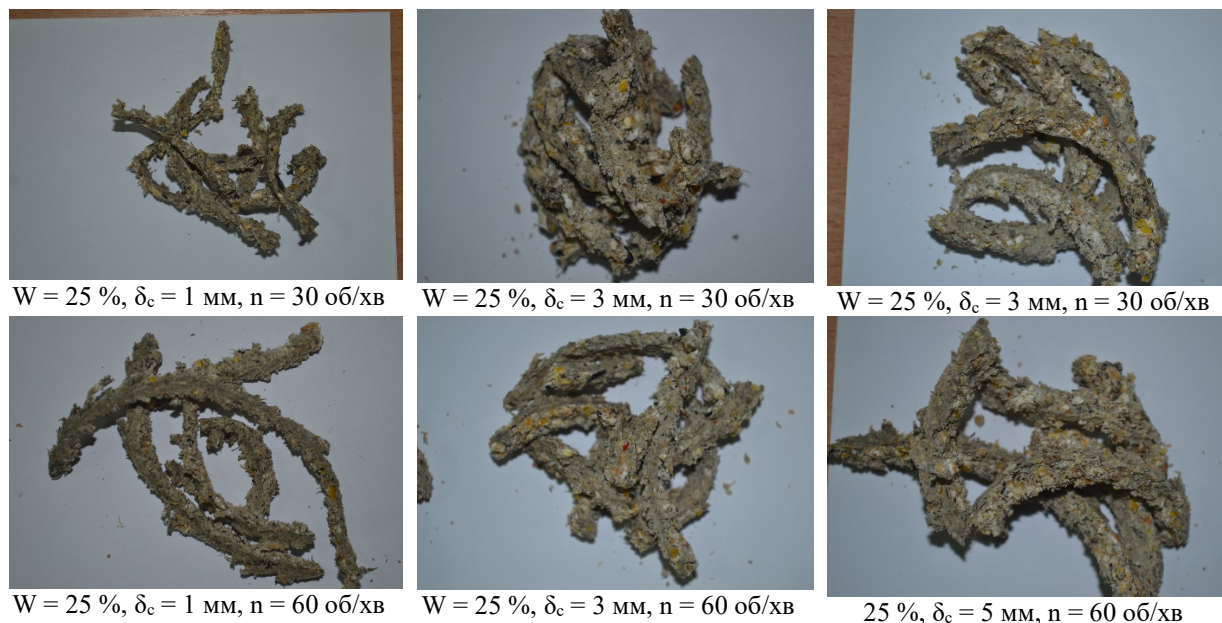


Рисунок 2 – Зразки отриманого продукту

Джерело: розроблено авторами

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність продуктивність експандера Q від факторів досліджень (рис. 3):

$$Q = 1,78314 + 0,401115 n + 1,41111 \delta_c. \quad (2)$$

Отримана модель адекватна за критерієм Фішера $F_p = 1,99 < F_{0,05}(12;30) = 2,09$, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена $G_p = 0,1082 < G_{0,05}(2;15) = 0,3346$.

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність споживаної потужності N від факторів досліджень (рис. 3):

$$N = 898,22 + 12,0228 n - 15,1022 W - 186,449 \delta_c + 31,0749 \delta_c^2. \quad (3)$$

Отримана модель адекватна за критерієм Фішера $F_p = 0,984 < F_{0,05}(11;30) = 2,13$, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена $G_p = 0,1456 < G_{0,05}(2;15) = 0,3346$.

З рис. 3 наочно видно, що із збільшенням частоти обертання гвинта n і зазору між конусом та гайкою δ_c продуктивність експандера Q збільшується. В свою чергу вологість комбікорму W не впливає на продуктивність. Із збільшенням частоти обертання гвинта n споживана потужність експандера Q збільшується, що є цілком логічним. Зменшення вологості комбікорму W також спричиняє збільшення потужності N . Це пояснюється збільшення сил внутрішнього і зовнішнього тертя, що виникають між частинками комбікорму і поверхнею робочих органів експандера. Для зазора спостерігається наявність оптимуму $\delta_c = 3,1$ мм, при якому потужність експандера N є мінімальною.

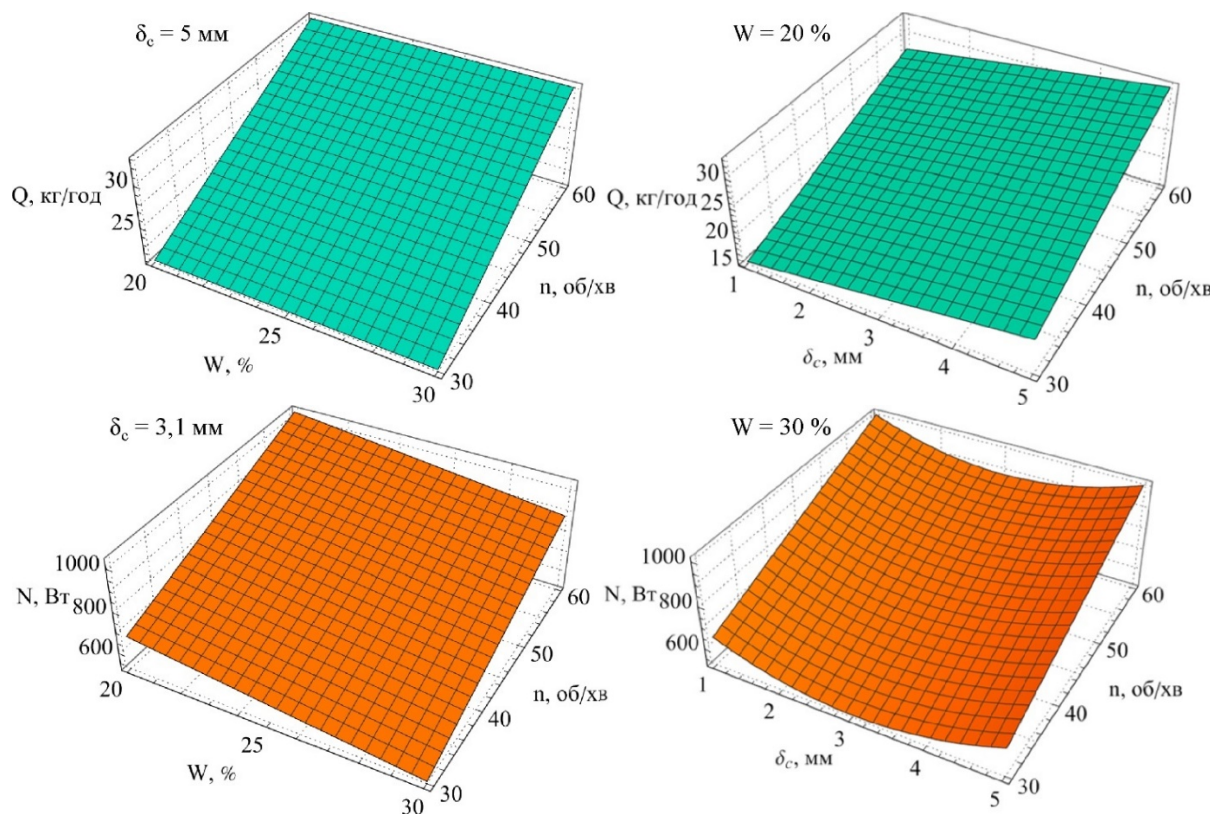


Рисунок 3 – Залежність продуктивності Q і споживаної потужності експандера N від вологості комбікорму W , зазору між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n

Джерело: розроблено авторами

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність зміни питомої енергоємності процесу експандування q від факторів досліджень (рис. 4):

$$q = 111,597 - 0,785547 n + 0,00721513 n^2 - 2,8468 W + 0,0524621 W^2 - 11,2437 \delta_c + 1,51579 \delta_c^2. \quad (4)$$

Отримана модель адекватна за критерієм Фішера $F_p = 0,8698 < F_{0,05}(8;30) = 2,27$, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена $G_p = 0,841 < G_{0,05}(2;15) = 0,3346$.

Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень, при яких спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування $q = 30,7$ кВт·год/т встановлено, що $W = 27,1$ %, $\delta_c = 3,7$ мм, $n = 54,4$ об/хв. При цьому продуктивність складала $Q = 28,8$ кг/год, а споживана потужність $N = 879$ Вт.

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність зміни щільності експандатів ρ від факторів досліджень (рис. 4):

$$q = 264,289 - 0,825 n + 12,902 W - 0,279201 W^2 - 7,25791 \delta_c^2. \quad (5)$$

Отримана модель адекватна за критерієм Фішера $F_p = 2,1118 < F_{0,05}(10;30) = 2,16$, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена $G_p = 0,1414 < G_{0,05}(2;15) = 0,3346$.

З рис. 4 наочно видно, що із збільшенням частоти обертання гвинта n щільність експандатів ρ зменшується. Це пояснюється тим, що збільшення частоти обертання зменшує час перебування матеріалу в області шнека, де відбуваються фізико-хімічні

процеси утворення експандату. Збільшення зазору між конусом та гайкою δ_c призводить до зменшення щільності, що також є цілком логічним: не утворюється необхідного підпору з боку конуса. Вологість матеріалу має оптимальне значення на рівні $W = 23,1\%$, що практично наближене до значення, яке отримано при лабораторних дослідженнях.

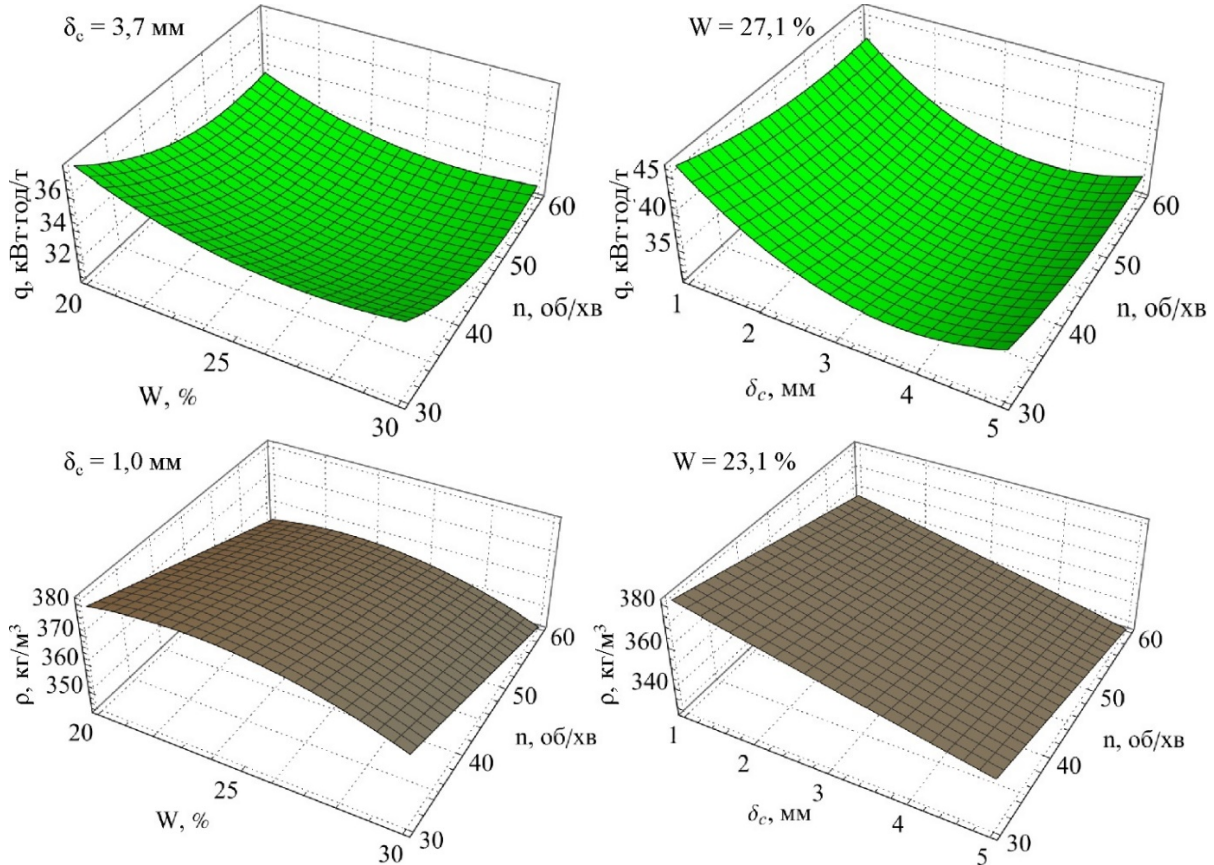


Рисунок 4 – Залежність питомої енергоємності процесу експандування q і щільності експандатів ρ від вологості комбікорму W , зазору між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n
Джерело: розроблено авторами

Також встановлено, що при раціональних значеннях $W = 27,1\%$, $\delta_c = 3,7$ мм, $n = 54,4$ об/хв, при яких питома енергоємність процесу експандування q є мінімальною, щільність експандатів складає $\rho = 336$ кг/м³.

Висновки. В результаті експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів встановлені залежності зміни продуктивності експандера Q (1), його споживаної потужності N (2), питомої енергоємності процесу експандування q (3) і щільності отриманих експандатів ρ (4) від вологості комбікорму W , зазора між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n .

Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень, при яких спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування $q = 30,7$ кВт·год/т, встановлено, що $W = 27,1\%$, $\delta_c = 3,7$ мм, $n = 54,4$ об/хв. При цьому продуктивність складала $Q = 28,8$ кг/год, споживана потужність $N = 879$ Вт, а щільність експандатів $\rho = 336$ кг/м³.

Список літератури

1. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / Е. Б.Алієв та ін. ; за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА, 2022 . 192 с. ISBN 978-966-981-687-0. http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_6.pdf (дата звернення: 17.08.2023)
2. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. 59 (18). 2979–2998. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007>.
3. Leonard W., Zhang P., Ying D., Fang Z. Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020. 19 (1): 218–246. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514>.
4. Adekola K. A. Engineering review food extrusion technology and its applications. *Journal of Food Science and Engineering*. 2016. 6 (3): 149–168. <https://doi.org/10.17265/2159-5828/2016.03.005>.
5. Bordoloi R., Ganguly S. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. *Indian Journal of Scientific Research and Technology*. 2014. 2 (1): 1–3.
6. Singh S., Gamlath S., Wakeling L. Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science and Technology*. 2007. Vol. 42 (8): 916–929. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x>.
7. Jozinović A., Ačkar Đ., Babić J., Miličević B., Jokić S., Šubarić D. The application of some food industry by-products in the production of extruded products. *Engineering Power: Bulletin of the Croatian Academy of Engineering*. 2017. 12 (1): 2–6.
8. Park S. H., Lamsal B. P., Balasubramaniam V. M. Principles of food processing. Food processing: principles and applications. Second Edition. 2014. 1–15. <https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch1>.
9. Choton S., Gupta N., Bandral J. D., Anjum N., Choudary A. Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The Pharma Innovation Journal*. 2020. 9 (2): 162–168. <https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367>
10. Ramachandra H. G., Thejaswini M. L. Extrusion technology: a novel method of food processing. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*. 2015. 2 (4): 358–369.
11. Shelar G. A., Gaikwad S. T. Extrusion in food processing: An overview. *The Pharma Innovation Journal*. 2019. 8 (2): 562–568.
12. Navale A. S., Swami B. S., Thakor N. J. Extrusion cooking technology for foods: A Review. *Journal of Ready to Eat Food*. 2015. 2 (3): 66–80.
13. Singh B., Sharma C., Sharma S. Fundamentals of extrusion processing. Novel Food Processing Technologies. New Delhi: New India Publishing Agency. 2017. 1–45. <https://doi.org/10.31219/osf.io/xqa5n>
14. Alam M. S., Kaur J., Khaira H., Gupta K. Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016. 56 (3): 445–473. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>.
15. Roye C., Henrion M., Chanvrier H., De Roeck K., De Bondt Y., Liberloo I., King R., Courtin C. M. Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran. *Foods*. 2020. 9(6): 738. <https://doi.org/10.3390/foods9060738>
16. Ajita T., Jha S. K. Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks – An overview. *International Journal of Food Studies*. 2017. 6 (1): 113–128. <https://doi.org/10.7455/ijfs/6.1.2017.a10>.
17. Fancher B. I., Rollins D., Trimbee B. Feed Processing Using the Annular Gap Expander and Its Impact on Poultry Performance. *Journal of Applied Poultry Research*. 1996. 5 (4): 386–394. DOI: 10.1093/japr/5.4.386
18. Guy R. Extrusion Cooking. Technologies and Applications. CRC Press Inc. Boca Ration. FL. 2001. 206 p. URL: https://mastermilk.com/uploads/biblio/extrusion_cooking_techniques_applications.pdf
19. Дудін В. Ю., Губа Є. В. Експериментальні дослідження дискового подрібнювача зерна. *Матеріали за 12-а міжнародна научна практична конференція, «Настоящи изследвания и развитие – 2016»*. Том 8. Лекарство. Биологии. Химия и химически технологии. Екология. География и геология. Селско стопанство (15–22-ти януари 2016). София. «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2016. С. 85–87.
20. Дудін В. Ю., Корнієнко А. А. Експериментальні дослідження процесу змішування сипких кормів. *Матеріали XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Kluczowe aspekty naukowej działalności - 2016»* Volume 8. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Rolnictwo. Techniczne nauki (7–15 stycznia 2016 roku). Przemysł. Nauka i studia, (2016). P. 30–32.

21. Алієв, Е. Б., Лінко, М. О., Алієва, О. Ю. Симуляція процесу експандованого приготування кормів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч.ІІ. С.176–185. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.176-185](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185)
22. Aliiev E., Dudin V., Linko M. Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics*. 2022. 13(3). P. 9-16. [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(3\).2022.9-16](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16)

Referencis

1. Aliyev, E. B., Mykolenko, S. Yu., Sova, N. A. et al. (2022). *Tekhniko-tehnologichne zabezpechennya bezvidkhodnoyi pererobky zernovoyi syrovyny u kharchovi produkty i kormy: kolektivna monohrafiya [Technical and technological support of waste-free processing of grain raw materials into food products and fodder: collective monograph / by general]*. E. B. Aliyeva (Eds.). Dnipro: LIRA ISBN 978-966-981-687-0. http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_6.pdf [in Ukrainian].
2. Offiah, V., Kontogiorgos, V. & Falade, K. O. (2019). Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (18), 2979–2998. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007> [in English].
3. Leonard, W., Zhang, P., Ying D. & Fang Z. (2020). Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19 (1), 218–246. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514> [in English].
4. Adekola, K. A. (2016). Engineering review food extrusion technology and its applications. *Journal of Food Science and Engineering*, 6 (3), 149–168. <https://doi.org/10.17265/2159-5828/2016.03.005> [in English].
5. Bordoloi, R. & Ganguly, S. (2014). Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. *Indian Journal of Scientific Research and Technology*, 2 (1), 1–3 [in English].
6. Singh, S., Gamlath, S. & Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 42 (8), 916–929. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x> [in English].
7. Jozinović, A., Ačkar, Đ., Babić, J., Miličević, B., Jokić, S. & Šubarić, D. (2017). The application of some food industry by-products in the production of extruded products. *Enineering Power: Bulletin of the Croatian Academy of Engineering*, 12 (1), 2–6 [in English].
8. Park, S. H., Lamsal B. P. & Balasubramaniam V. M. (2014). *Principles of food processing. Food processing: principles and applications*. Second Edition: 1–15. <https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch1> [in English].
9. Choton, S., Gupta, N., Bandral J. D., Anjum, N. & Choudary, A. (2020). Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 9 (2) , 162–168. <https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367> [in English].
10. Ramachandra, H. G. & Thejaswini, M. L. (2015). Extrusion technology: a novel method of food processing. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 2 (4) , 358–369 [in English].
11. Shelar, G. A. & Gaikwad, S. T. (2019). Extrusion in food processing: An overview. *The Pharma Innovation Journal*, 8 (2) , 562–568 [in English].
12. Navale, A. S., Swami, B. S., Thakor, N. J. (2015). Extrusion cooking technology for foods: A Review. *Journal of Ready to Eat Food*, 2 (3) , 66–80 [in English].
13. Singh, B., Sharma, C. & Sharma S. (2017). *Fundamentals of extrusion processing*. Novel Food Processing Technologies. New Delhi: New India Publishing Agency. 1–45. <https://doi.org/10.31219/osf.io/xqa5n> [in English].
14. Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H. & Gupta, K. (2016). Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56 (3) , 445–473. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568> [in English].
15. Roye, C., Henrion, M., Chanvrier, H., De Roeck, K., De Bondt, Y., Liberloo, I., King, R. & Courtin, C. M. (2020). Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran. *Foods*, 9(6), 738. <https://doi.org/10.3390/foods9060738> [in English].
16. Ajita, T. & Jha, S. K. (2017). Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks – An overview. *International Journal of Food Studies*, 6 (1), 113–128. <https://doi.org/10.7455/ijfs/6.1.2017.a10> [in English].

17. Fancher, B. I., Rollins, D. & Trimbee, B. (1996). Feed Processing Using the Annular Gap Expander and Its Impact on Poultry Performance. *Journal of Applied Poultry Research*, 5 (4), 386–394. DOI: 10.1093/japr/5.4.386 [in English].
18. Guy, R. (2001). *Extrusion Cooking. Technologies and Applications*. CRC Press Inc. Boca Ration. FL. 206 p. Retrieved from: https://mastermilk.com/uploads/biblio/extrusion_cooking_techniques_applications.pdf [in English].
19. Dudin, V. Yu. & Huba, Ye. V. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia diskovoho podribniuvacha zerna [Experimental studies of the disk grain chopper]. *Nastoiashchy yzslედvannya y rozvytye – 2016: 12-a mezhdunarodna nauchna praktychna konferentsiya*, Vol.8. Lekarstvo. Byolohyy. Khymyia y khymychesky tekhnolohyy. Ekolohyia. Heohrafyia y heolohyia. Selsko stopanstvo (15–22-ty yanuary 2016). Sofyia. «Bial HRAD-BH» OOD: 85–87. [in Ukrainian].
20. Dudin V. Yu. & Korniienko A. A. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia protsesu zmishuvannia sypkykh kormiv [Experimental studies of the process of mixing loose fodder.]. *Kluczowe aspekty naukowej dzialalności – 2016: XII Międzynarodowej naukow-praktycznej konferencji*, Vol. 8. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Rolnictwo. Techniczne nauki (7–15 stycznia 2016 roku). Przemysł. Nauka i studia: 30–32. [in Ukrainian].
21. Aliiev, E. B., Linko, M. O. & Aliieva, O. Yu. (2022). Symuliatyia protsesu ekspandovanoho pryhotuvannia kormiv [Simulation of the process of expanded feed preparation]. *Tsentrálnoukraiński naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 5(36), II, 176–185. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.176-185](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185) [in Ukrainian].
22. Aliiev, E., Dudin, V. & Linko, M. (2022). Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics*, 13(3), 9-16. [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(3\).2022.9-16](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16) [in English].

Elchyn Aliiev, Senior Researcher, Prof., DSc., **Volodymyr Dudin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Linko**, post graduate student
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Results of Experimental Studies of a Small-sized Fodder Expander

The purpose of the research is to substantiate the structural and technological parameters of the small-sized fodder expander experimentally.

The use of expanders is necessary in the production of feed and food products, as these technical means allow to improve the quality and nutritional characteristics of the final product. Thanks to their high productivity and the ability to adjust pressure, expanders provide effective processing of materials, while preserving their useful properties. Therefore, the optimization of technological parameters for the formation of expanders remains an urgent task in the engineering of expanders.

As a result of experimental studies of a small-sized fodder expander, the dependences of the change in the productivity of the expander Q , its consumed power N , the specific energy capacity of the expansion process q and the density of the obtained expanders ρ on the moisture content of the compound feed W , the gap between the cone and the nut δ_c , and the frequency of rotation of the screw n were established. Having found in the Wolfram Cloud software package the value of the research factors in which the minimum value of the specific energy intensity of the expansion process $q = 30.7$ kWh/t is observed, it was established that $W = 27.1$ %, $\delta_c = 3.7$ mm, $n = 54.4$ rpm. At the same time, the productivity was $Q = 28.8$ kg/h, the power consumption $N = 879$ W, and the density of the expanders $\rho = 336$ kg/m³.

feed, expander, experiment, parameters, performance, energy consumption, humidity, rotation frequency, gap, cone

Одержано (Received) 29.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 12.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 25.12.2023