

Обґрунтування конструкційних параметрів формувальної насадки експандера кормів

Алієв Е. Б.,

д.т.н., старший дослідник, Дніпровський державний аграрно-економічний університет;
ORCID iD 0000-0003-4006-8803

Лінко М. О.,

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, Дніпровський державний аграрно-економічний університет; ORCID iD 0000-0002-1353-4832

Анотація

Мета. На основі чисельного моделювання обґрунтувати форму та конструкційні параметри формувальної насадки експандера і визначити показники якості технологічного процесу експандування кормів.

Методи. Чисельне моделювання проводилося в САЕ-системі STAR-CCM+. Для моделювання прийнято такі моделі континуума: безсіткова модель дискретних елементів (DEM), Лагранжева багатофазність, граничні сили DEM, нестационарний неявний вирішувач, модель інтерполяції рішення, сила тяжіння. Компоненти кормової суміші представлені у вигляді суцільних сферичних частинок DEM із постійною щільністю. Взаємодія частинок між собою й стінкою підпорядковувалася моделям Герца-Міндліна з опором кочення та лінійного зчеплення.

Результати. Унаслідок чисельного моделювання визначено динаміку і розподіл компонентів кормової суміші в порожнині між циліндром формувальної насадки та конусом за силою тиску та силою контактної взаємодії компонентів корму між собою залежно від радіуса звуження циліндра формувальної насадки R_r , радіуса увігнутого конуса R_c та відстані між конусом і циліндром δ_c . Установлено рівняння регресії щільності ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формувальної насадки та максимального тиску P_{max} , який необхідно прикласти для продавлювання

пластифікованої маси компонентів корму через формувальну насадку вздовж їхнього руху від зазначених факторів досліджень.

Висновки. Унаслідок чисельного моделювання визначено динаміку та розподіл компонентів кормової суміші в порожнині між циліндром формувальної насадки і конусом за силою тиску F_p та силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$ залежно від радіуса звуження циліндра формувальної насадки R_r , радіуса увігнутого конуса R_c та відстані між конусом і циліндром δ_c . Установлено рівняння регресії щільності ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формувальної насадки та максимального тиску P_{max} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формувальну насадку вздовж їхнього руху, від зазначених факторів досліджень. Унаслідок вирішення завдання багатокритеріальної оптимізації критеріїв досліджень, а саме зменшення тиску P_{max} та підвищення щільності ρ_{out} , на основі знаходження оптимуму мультиплікативної цільової функції встановлено раціональні конструкційні параметри формувальної насадки: $R_r = 14,2$ мм, $R_c = 89,9$ мм, $\delta_c = 5,7$ мм.

Ключові слова: експандер, формувальна насадка, чисельне моделювання, параметр, конструкція, щільність, тиск.

UDC 631.36

Justification of the design parameters of the forming nozzle of the fodder expander

Aliiev E. B.,

Ph.D., senior researcher, Dnipro State Agrarian and Economic University;
ORCID iD 0000-0003-4006-8803

Linko M. O.,

Recipient of the third (educational and scientific) level of higher education, Dnipro State Agrarian and Economic University; ORCID iD 0000-0002-1353-4832

Annotation

Purpose. On the basis of numerical modeling, justify the shape and design parameters of the forming

nozzle of the expander and determine the quality indicators of the technological process of fodder expansion.

Methods. Numerical modeling was carried out in the STAR-CCM+ CAE system. The following continuum models are adopted for modeling: meshless discrete element model (DEM), Lagrangian multiphase, DEM boundary forces, non-stationary implicit solver, solution interpolation model, gravity. The components of the feed mixture are presented in the form of solid spherical DEM particles with a constant density. The interaction of particles between themselves and the wall was subject to Hertz-Mindlin models with rolling resistance and linear coupling.

Results. As a result of numerical modeling, the dynamics and distribution of the components of the feed mixture in the cavity between the cylinder of the forming nozzle and the cone were determined by the pressure force F_p and the force of contact interaction of the components of the feed with each other $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$, depending on the radius of the narrowing of the cylinder of the forming nozzle R_r , the radius of the concave cone R_c and the distance between the cone and the cylinder δ_c . The regression equations of the density ρ_{out} of the plasticized mass of feed components at the exit from the forming nozzle and the maximum pressure P_{max} , which must be applied to push the plasticized mass of feed components through the forming nozzle along their movement from the specified research factors, are established.

Conclusions. As a result of numerical modeling, the dynamics and distribution of the components of the feed mixture in the cavity between the cylinder of the forming nozzle and the cone were determined according to the pressure force F_p and the force of contact interaction of the feed components with each other depending on the radius of the narrowing of the cylinder of the forming nozzle R_r , the radius of the concave cone R_c and the distance between the cone and the cylinder δ_c . The regression equation of the density ρ_{out} of the plasticized mass of feed components at the exit from the molding nozzle and the maximum pressure P_{max} , which must be applied to push the plasticized mass of feed components through the molding nozzle along their movement, is established, from the specified research factors. As a result of solving the task of multi-criteria optimization of the research criteria, namely reducing the pressure P_{max} and increasing the density ρ_{out} , on the basis of finding the optimum of the multiplicative objective function, rational design parameters of the molding nozzle were established: $R_r = 14.2$ mm, $R_c = 89.9$ mm, $\delta_c = 5.7$ mm.

Keywords: expander, forming nozzle, numerical simulation, parameter, design, density, pressure.

Постановка проблеми. Форма геометрії насадки експандера суттєво впливає на якість та пропускну здатність експандованого

корму, що робить її вирішальною для досягнення техніко-економічної ефективності [1]. Щоб зменшити енерговитрати, існують методи аналітичного розрахунку, які враховують рух та руйнування твердих речовин, що забезпечує від проведення довготривалих експериментів методом проб та помилок. Існує багато припущень та спрощень, необхідних для отримання аналітичного рішення, таких як припущення, що компоненти кормів утворюють твердий шар, який рухається з рівномірною швидкістю [2]. Останнім часом все більш поширюється моделювання з використанням методу дискретних елементів (DEM) для опису твердих тіл, що рухаються в грануляторах, екструдерах або експандерах, тому що цей метод дозволяє враховувати відносні переміщення між частинками [3–5]. Використання імітаційної моделі DEM дає змогу віртуально проєктувати експерименти та отримувати велику базу даних для оцінювання ефективності технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До цього часу було розроблено багато підходів для опису руху твердих матеріалів у грануляторах, екструдерах та експандерах, але всі вони базуються на моделі Дарнелла та Мола [6]. У цій моделі гранули уявляються як тверде тіло, що рухається в потоці блоків через гвинтовий канал у вигляді твердого шару. Рух гранул обчислюється на основі рівноваги сил і моментів, що діють на твердий шар, таких як сила тиску та сила тертя. Відтоді було вивчено та адаптовано багато наукових досліджень із моделювання руху гранул, зокрема взаємодію сил. Для аналізу руху твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера використовується метод дискретних елементів (DEM), який базується на динаміці переміщення систем твердих частинок [7, 8]. Дискретні елементи, що відображають тверді кормові компоненти, подаються у гвинтовий канал через бункер. Зазвичай потік у бункері здійснюється самопливом, хоча іноді потрібні додаткові зусилля. Після введення у гвинтовий канал експандера компоненти корму переміщуються вздовж горизонтальної лінії по спіралі. Зменшення геометричних розмірів гвинтового каналу призводить до ущільнення компонентів корму, що утворює твердий шар або конгломерат, який далі транспортується до формувальної насадки.

Мета досліджень. На основі чисельного моделювання обґрунтувати форму та конструкційні параметри формувальної насадки експандера і визначити показники якості технологічного процесу експандування кормів.

Методи досліджень. Чисельне моделювання проводилося в САЕ-системі STAR-CCM+. Для моделювання прийнято такі моделі континуума: безсіткова модель дискретних елементів (DEM), Лагранжева багатозфазність, граничні сили DEM, нестационарний неявний вирішувач, модель інтерполяції рішення, сила тяжіння. Компоненти кормової суміші представлені у вигляді суцільних сферичних частинок DEM із постійною щіль-

ністю. Взаємодія частинок між собою й стінкою підпорядковувалася моделям Герца-Міндліна з опором кочення та лінійного зчеплення.

Методика досліджень. Формувальна насадка експандера кормів складається із циліндра, гайки корончастої та увігнутого конуса. Гайка корончата складається з 20 жолобків, в яких переміщуються сформовані експандати. Циліндр формувальної насадки має невелике звуження в середині, яке необхідне для підвищення тиску. Схему чисельного моделювання формувальної насадки представлено на рисунку 1.

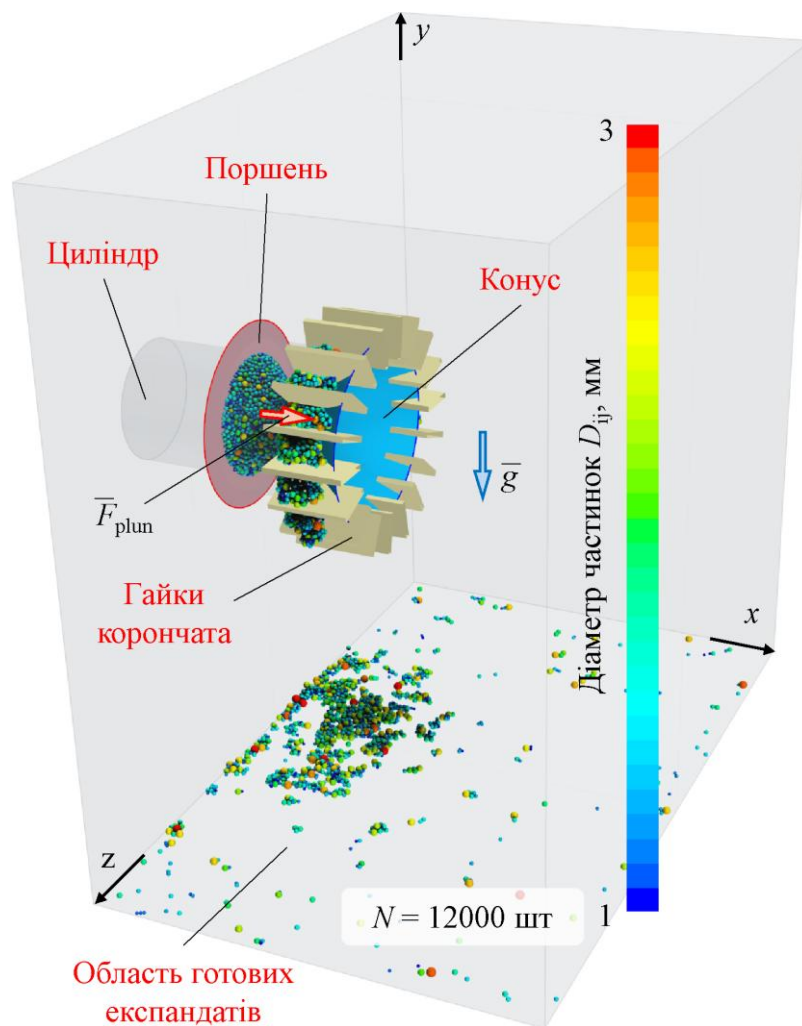


Рис. 1. Схема чисельного моделювання формувальної насадки експандера
Fig. 1. Numerical modeling scheme of the forming nozzle of the expander

Початкова загальна кількість частинок компонентів кормів була 12000 шт., які розміщалися в порожнині циліндра. Далі поршень починає рухатися зі швидкістю 0,01 м/с в бік конуса, стискаючи при цьому компоненти кормів і переміщаючи їх до отворів між конусом і жолобками гайки корончастої. Чисельне моделювання проводилося в САЕ-системі STAR-CCM+ [9–11].

Згідно з попередніми лабораторними дослідженнями та літературними джерелами [12–14] фізико-механічні властивості компонентів кормової суміші прийняті такі: щільність – 700 кг/м³; модуль пружності Юнга – 10–30 МПа; коефіцієнт Пуассона – 0,2–0,4; коефіцієнт тертя спокою – 0,61; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; робота когезії на одиницю площі – 0–0,5 Н/м; діаметр частинок – 1–3 мм (за нормальним розподілом, середньоквадратичне відхилення – 1 мм); кількість частинок – 12000 шт (висота кормової суміші насипом у циліндричній ємності – 41,6 мм).

За фактори досліджень прийняті такі конструкційні параметри формувальної насадки з увігнутим конусом (рис. 2): радіус звуження циліндра формувальної насадки R_r , радіус увігнутого конуса R_c , відстань між конусом і циліндром δ_c .

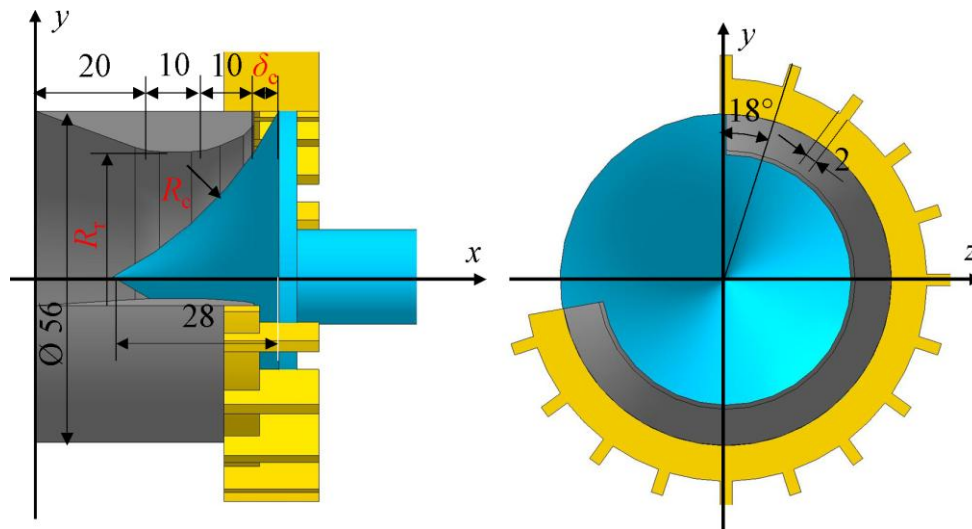


Рис. 2. Схема факторів чисельного моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші у формувальній насадці з увігнутим конусом

Fig. 2. Scheme of factors of numerical modeling of the process of compression of feed mixture components in a forming nozzle with a concave cone

Рівні та межі варіювання наведено в таблиці. Моделювання проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю моделювань – $3^3 = 27$.

Таблиця. Рівні та межі варіювання чисельного моделювання
Table. Levels and limits of variation of numerical modeling

Фактор	Радіус звуження циліндра формувальної насадки		Радіус увігнутого конуса		Відстань між конусом і циліндром	
	x_4	R_r , мм	x_5	R_c , мм	x_6	δ_c , мм
Низький	-1	10	-1	30	-1	3
Середній	0	15	0	70	0	6
Високий	+1	20	+1	100	+1	9

За енергетичний критерій досліджень обрано загальний тиск поршня P_Σ , який необхідно прикласти для продавлювання компонентів корму через формувальну насадку. За якісний критерій обрано щільність ρ_Σ пластифікованої маси компонентів корму на виході з формувальної насадки.

Результати досліджень. На рисунку 3 представлено розподіл компонентів кормової суміші в порожнині між циліндром формувальної насадки та конусом (при $R_r = 15$ мм, $R_c = 70$ мм, $\delta_c = 6$ мм) за силою тиску F_p та силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$.

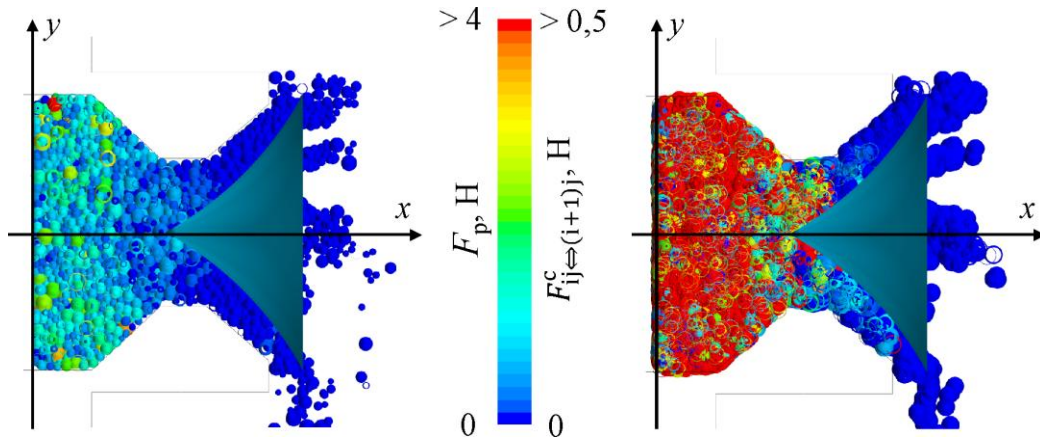


Рис. 3. Розподіл компонентів кормової суміші в області формувальної насадки за силою тиску F_p та силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$

$$(R_r = 15 \text{ мм}, R_c = 70 \text{ мм}, \delta_c = 6 \text{ мм})$$

Fig. 3. Distribution of the components of the feed mixture in the area of the forming nozzle according to the pressure force F_p and the force of contact interaction of the feed components with each other

$$F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c (R_r = 15 \text{ мм}, R_c = 70 \text{ мм}, \delta_c = 6 \text{ мм})$$

Динаміку зміни значень загального тиску поршня P_Σ , об'єму порожнини між циліндром формувальної насадки та конусом V_s , об'єму V_p та щільності ρ_Σ пластифікованої маси компонентів корму вздовж їхнього руху (вісь Ox) наведено на рисунку 4.

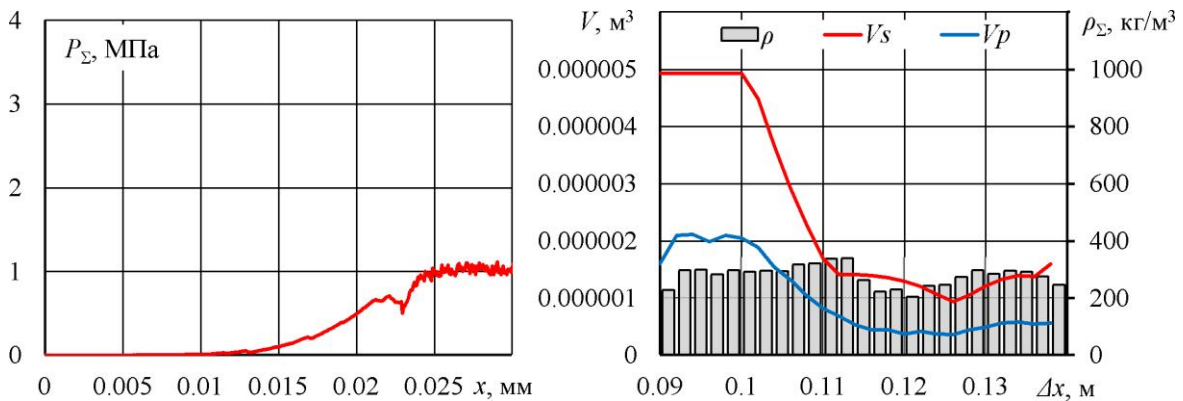


Рис. 4. Залежність загального тиску поршня P_Σ , об'єму порожнини між циліндром формувальної насадки та конусом V_s , об'єму V_p та щільності ρ_Σ пластифікованої маси компонентів корму вздовж її руху ($R_r = 15 \text{ мм}, R_c = 70 \text{ мм}, \delta_c = 6 \text{ мм}$)

Fig. 4. Dependence of the total pressure of the piston P_Σ , the volume of the cavity between the cylinder of the forming nozzle and the cone V_s , the volume V_p and the density ρ_Σ of the plasticized mass of the feed components along its movement ($R_r = 15 \text{ мм}, R_c = 70 \text{ мм}, \delta_c = 6 \text{ мм}$)

З рисунка 4 видно, що вздовж руху пластифікованої маси компонентів корму збільшується загальний тиск P_Σ до граничного значення. Далі тиск стабілізується, що свідчить про рівновагу процесу. Тобто цього максимального тиску достатньо для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму. Зі свого боку щільність ρ_Σ пластифікованої маси компонентів корму вздовж її руху змінюється нерівномірно. Це пов'язано з нерівномірністю об'єму порожнини між циліндром формувальної насадки та конусом V_s . Однак для процесу є важливою саме та щільність пластифікованої маси компонентів корму, яка сформувалася на виході з формувальної насадки.

Провівши обробку даних у Wolfram Cloud, отримано рівняння регресії максимального загального тиску поршня P_{\max} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формувальну насадку, від факторів досліджень:

$$P_{\max} = 5,62305 - 0,859031 \delta_c + 0,037993 \delta_c^2 + 0,00762086 R_c - 0,184834 R_r + 0,0141087 d_c R_r. \quad (1)$$

У результаті статистичної обробки в Wolfram Cloud, використовуючи параметр «ParameterTable» для функції «NonlinearModelFit», було відхилено незначущі коефіцієнти за критерієм Стюдента ($t_{0,05}(27) = 2,05$) і проведено розкодування рівняння регресії. Графічну інтерпретацію рівняння (1) наведено на рисунку 5. З огляду на умови мінімізації енерговитрат загальний тиск поршня P_{\max} повинен бути мінімальним. З використанням у Wolfram Cloud функції «FindMinimum» було розраховано оптимальні значення факторів, за яких це можливо: $R_r = 20$ мм, $R_c = 40$ мм, $\delta_c = 7,59$ мм. При цьому $P_{\max} = 0,041$ МПа.

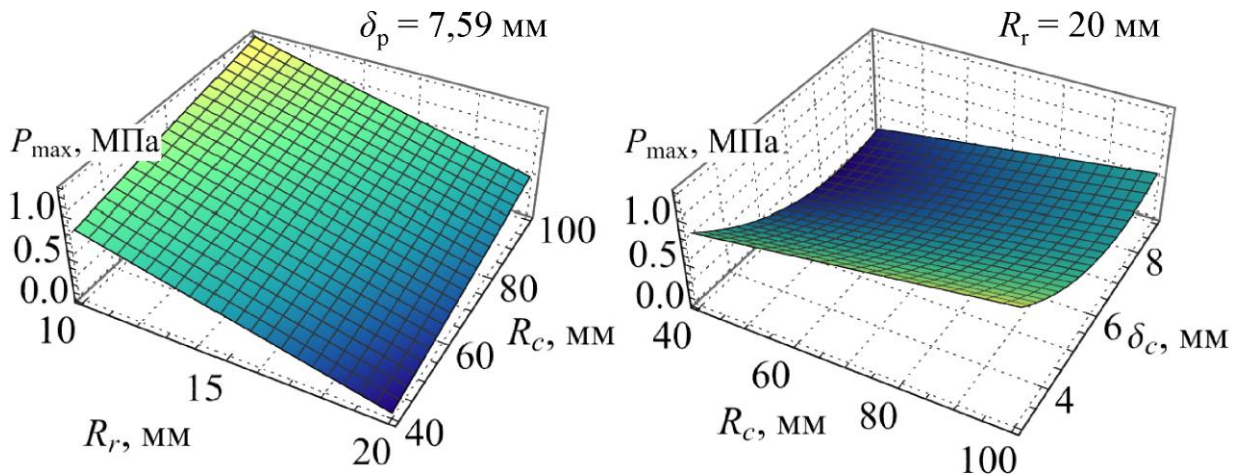


Рис. 5. Залежність максимального загального тиску поршня P_{\max} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формувальну насадку, від радіуса звуження циліндра формувальної насадки R_r , радіуса увігнутого конуса R_c та відстані між конусом і циліндром δ_c

Fig. 5. Dependence of the maximum total pressure of the piston P_{\max} , which must be applied to push the plasticized mass of feed components through the forming nozzle, from the radius of the narrowing of the cylinder of the forming nozzle R_r , the radius of the concave cone R_c and the distance between the cone and the cylinder δ_c

Провівши обробку даних у Wolfram Cloud, отримано рівняння регресії щільності ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формувальної насадки в розкодованому вигляді:

$$\rho_{\text{out}} = 381,881 - 22,7835 \delta_c + 1,46774 R_c - 4,25958 R_r + 0,661457 \delta_c R_r - 0,0568048 R_c R_r. \quad (2)$$

Статистична обробка даних у Wolfram Cloud дозволила відхилити незначущі коефіцієнти рівняння регресії, порівнюючи їх із табличним значенням критерія Стюдента ($t_{0,05}(27) = 2,05$). Графічну інтерпретацію рівняння (2) наведено на рисунку 6. З огляду на умови покращення якості отриманих експандатів щільність ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формувальної насадки повинна бути мінімальною. З використанням у Wolfram Cloud функції «FindMinimum» було розраховано оптимальні значення факторів, за яких це можливо: $R_r = 10$ мм, $R_c = 100$ мм, $\delta_c = 3$ мм. При цьому $\rho_{\text{out}} = 380,7$ кг/м³.

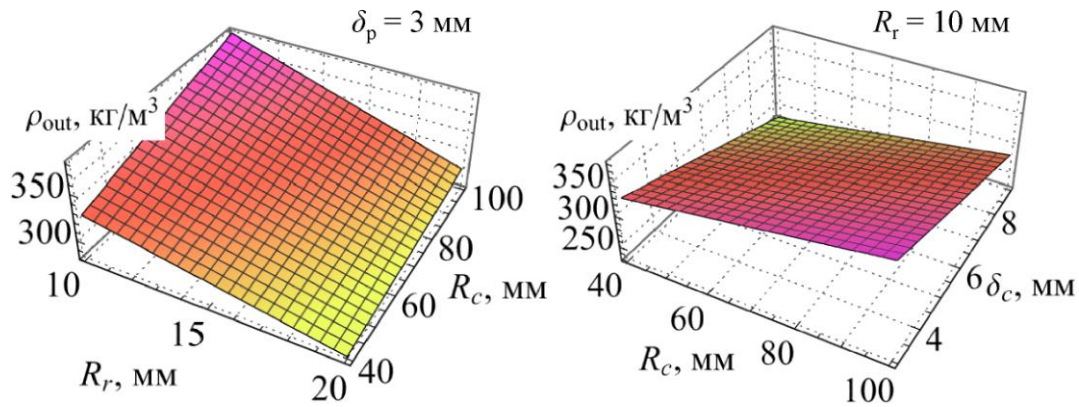


Рис. 6. Залежність щільності ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формувальної насадки від радіуса звуження циліндра формувальної насадки R_r , радіуса увігнутого конуса R_c та відстані між конусом і циліндром δ_c

Fig. 6. Dependence of the density ρ_{out} of the plasticized mass of feed components at the exit from the forming nozzle on the radius of the narrowing of the cylinder of the forming nozzle R_r , the radius of the concave cone R_c and the distance between the cone and the cylinder δ_c

Як видно з рисунків 5, 6, оптимальні значення критеріїв відрізняються, тому необхідно вирішити задачу багатокритеріальної оптимізації. Під багатокритеріальною оптимізацією розуміється процес одночасної оптимізації двох або більше цільових функцій критеріїв оптимізації, що конфліктують у заданій області визначення:

$$\begin{cases} P_{max}(R_r, R_c, \delta_c) \rightarrow \min; \\ \rho_{out}(R_r, R_c, \delta_c) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (3)$$

Тому завдання багатокритеріальної оптимізації полягає в знаходженні такого вектора факторів, який мінімізував би векторну цільову функцію. Використаємо такий методичний підхід до вирішення задач багатокритеріальної оптимізації:

– згортання вихідної векторної цільової функції критерію оптимізації до скалярного вигляду з попереднім її перетворенням унаслідок нормалізації вхідних часткових цільових функцій;

– знаходження оптимуму мультиплікативної цільової функції.

Нормалізація часткових цільових функцій критеріїв оптимізації передбачає їх приведення до єдиного безрозмірного виду та зміни їхніх величин у межах одиничного інтервалу:

$$\begin{aligned} P^*_{max}(R_r, R_c, \delta_c) &= \frac{\max[P_{max}(R_r, R_c, \delta_c)] - P_{max}(R_r, R_c, \delta_c)}{\max[P_{max}(R_r, R_c, \delta_c)] - \min[P_{max}(R_r, R_c, \delta_c)]}; \\ \rho^*_{out}(R_r, R_c, \delta_c) &= \frac{\rho_{out}(R_r, R_c, \delta_c) - \min[\rho_{out}(R_r, R_c, \delta_c)]}{\max[\rho_{out}(R_r, R_c, \delta_c)] - \min[\rho_{out}(R_r, R_c, \delta_c)]}. \end{aligned} \quad (4)$$

Як нову мультиплікативну цільову функцію W^* приймаємо:

$$W^*(R_r, R_c, \delta_c) = P^*_{max}(R_r, R_c, \delta_c) \cdot \rho^*_{out}(R_r, R_c, \delta_c). \quad (5)$$

Тоді задача (3) зводиться до більш простої:

$$W^*(R_r, R_c, \delta_c) \rightarrow \max. \quad (6)$$

Вирішуючи задачу (6) спільно з (4), (5) і (1), (2) у Wolfram Cloud із використанням функції «FindMinimum», було розраховано оптимальні значення факторів, за яких це можливо: $R_r = 14,2$ мм, $R_c = 89,9$ мм, $\delta_c = 5,7$ мм. При цьому $\rho_{out} = 304,8$ кг/м³ і $P_{max} = 1,17$ МПа.

Висновки. Унаслідок чисельного моделювання визначено динаміку та розподіл компонентів кормової суміші в порожнині між циліндром формувальної насадки і конусом за силою тиску F_p та силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$ залежно від радіуса звуження циліндра формувальної насадки R_r , радіуса увігнутого конуса R_c та відстані між конусом і циліндром δ_c . Установлено рівняння регресії щільності ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формувальної насадки та максимального тиску P_{max} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формувальну насадку вздовж їхнього руху, від зазначених факторів досліджень. Унаслідок вирішення завдання багатокритеріальної оптимізації критеріїв досліджень, а саме зменшення тиску P_{max} та підвищення щільності ρ_{out} , на основі знаходження оптимуму мультиплікативної цільової функції встановлено раціональні конструкційні параметри формувальної насадки: $R_r = 14,2$ мм, $R_c = 89,9$ мм, $\delta_c = 5,7$ мм.

Бібліографія

- Guy, R. (Ed.). *Extrusion Cooking: Technologies and Applications*. (2001). Soustons : Woodhead. 216 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781439822944>.
- White, J. L., Potente, H., & Berghaus, U. (2003). *Screw Extrusion: Science and Technology*. Munich : Hanser Publishers. 444 p.
- Nielsen, S. K. (2016). *Numerical modeling of the wood pelleting process* : master thesis. 121 p.
- Rodríguez, E. O. (2009). *Numerical simulations of reactive extrusion in twin screw extruders* : thesis for the degree of Doctor of Philosophy in chemical engineering. Waterloo, Ontario, Canada. 254 p.
- Lewandowski, A., & Wilczyn'ski, K. (2022). Modeling of twin screw extrusion of polymeric materials. *Polymers*, 14 (274), 28. doi: <https://doi.org/10.3390/polym14020274>.

6. Darnell, W. H., & Mol, E. A. J. (1956). Solids Conveying in Extruders. *SPE Journal*, 12 (4), 20–29.

7. Pachón-Morales, J., Do, H., Colin, J., Puel, F., & Perre, P. (2019). DEM modelling for flow of cohesive lignocellulosic biomass powders: Model calibration using bulk tests. *Advanced Powder Technology*, 30 (4), 732–750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.003>.

8. Lupo, M., Sofia, D., Barletta, D., & Poletto, M. (2019). Calibration of DEM Simulation of Cohesive Particles. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 379–384. doi: <https://doi.org/10.3303/CET1974064>.

9. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., & Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1), 95–104.

10. Aliiev, E., & Lupko, K. (2021). Prerequisites for the creation of a mechatronic system of indented cylinders for the separation of fine seeds. *Scientific Horizons*, 24 (3), 75–86. doi: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(3\).2021.75-86](https://doi.org/10.48077/scihor.24(3).2021.75-86).

11. Shevchenko, I., Aliiev, E., Viselga, G., & Kaminski, J. R. (2021). Modeling separation process for sunflower seed mixture on vibropneumatic separators. *MECHANIKA*, 27 (4), 311–320. doi: <https://doi.org/10.5755/j02.mech.27647>.

12. Li, Y. M., Chandio, F. A., Ma, Z., Lakhari, I. A., Sahito, A. R., & Ahmad, F. (2018). Mechanical strength of wheat grain varieties influenced by moisture content and loading rate. *Int J Agric & Biol Eng*, 11 (4), 52–57.

13. Mohammad Reza Seifi & Reza Alimardani. (2010). The moisture content effect on some physical and mechanical properties of corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science Archives*, 2 (4), 125–134. doi: <https://doi.org/10.5539/jas.v2n4p125>

14. Yaropud, V., Honcharuk, I., Datsiuk, D., & Aliiev, E. (2022). The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, XXXIII (1), 199–208. doi: <https://doi.org/10.15159/jas.22.08>.

Bibliohrafiia

- Guy, R. (Ed.). *Extrusion Cooking: Technologies and Applications*. (2001).

Soustons : Woodhead. 216 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781439822944>.

2. White, J. L., Potente, H., & Berghaus, U. (2003). *Screw Extrusion: Science and Technology*. Munich : Hanser Publishers. 444 p.

3. Nielsen, S. K. (2016). Numerical modeling of the wood pelleting process : master thesis. 121 p.

4. Rodríguez, E. O. (2009). Numerical simulations of reactive extrusion in twin screw extruders : thesis for the degree of Doctor of Philosophy in chemical engineering. Waterloo, Ontario, Canada. 254 p.

5. Lewandowski, A., & Wilczyn'ski, K. (2022). Modeling of twin screw extrusion of polymeric materials. *Polymers*, 14 (274), 28. doi: <https://doi.org/10.3390/polym14020274>.

6. Darnell, W. H., & Mol, E. A. J. (1956). Solids Conveying in Extruders. *SPE Journal*, 12 (4), 20–29.

7. Pachón-Morales, J., Do, H., Colin, J., Puel, F., & Perre, P. (2019). DEM modelling for flow of cohesive lignocellulosic biomass powders: Model calibration using bulk tests. *Advanced Powder Technology*, 30 (4), 732–750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.01.003>

8. Lupo, M., Sofia, D., Barletta, D., & Poletto, M. (2019). Calibration of DEM Simulation of Cohesive Particles. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 379–384. doi: <https://doi.org/10.3303/CET1974064>.

9. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., & Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1), 95–104.

10. Aliiev, E., & Lupko, K. (2021). Prerequisites for the creation of a mechatronic system of indented cylinders for the separation of fine seeds. *Scientific Horizons*, 24 (3), 75–86. doi: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(3\).2021.75-86](https://doi.org/10.48077/scihor.24(3).2021.75-86).

11. Shevchenko, I., Aliiev, E., Viselga, G., & Kaminski, J. R. (2021). Modeling separation process for sunflower seed mixture on vibro-pneumatic separators. *MECHANIKA*, 27 (4), 311–320. doi: <https://doi.org/10.5755/j02.mech.27647>.

12. Li, Y. M., Chandio, F. A., Ma, Z., Lakhari, I. A., Sahito, A. R., & Ahmad, F. (2018). Mechanical strength of wheat grain varieties influenced by moisture content and loading rate. *Int J Agric & Biol Eng.*, 11 (4), 52–57.

13. Mohammad Reza Seifi & Reza Alimardani. (2010). The moisture content effect on some physical and mechanical properties of corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science Archives*, 2 (4), 125–134. doi: <https://doi.org/10.5539/jas.v2n4p125>.

14. Yaropud, V., Honcharuk, I., Datsiuk, D., & Aliiev, E. (2022). The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, XXXIII (1), 199–208. doi: <https://doi.org/10.15159/jas.22.08>.

References

1. Guy, R. (Ed.). *Extrusion Cooking: Technologies and Applications*. (2001). Soustons : Woodhead. 216 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781439822944>.

2. White, J. L., Potente, H., & Berghaus, U. (2003). *Screw Extrusion: Science and Technology*. Munich: Hanser Publishers. 444 p.

3. Nielsen, S. K. (2016). Numerical modeling of the wood pelleting process. (Master's thesis). 121 p.

4. Rodríguez, E. O. (2009). Numerical simulations of reactive extrusion in twin screw extruders. (Doctor's thesis). Waterloo, Ontario, Canada. 254 p.

5. Lewandowski, A., & Wilczyn'ski, K. (2022). Modeling of twin screw extrusion of polymeric materials. *Polymers*, 14 (274), 28. doi: <https://doi.org/10.3390/polym14020274>.

6. Darnell, W. H., & Mol, E. A. J. (1956). Solids Conveying in Extruders. *SPE Journal*, 12 (4), 20–29.

7. Pachón-Morales, J., Do, H., Colin, J., Puel, F., & Perre, P. (2019). DEM modelling for flow of cohesive lignocellulosic biomass powders: Model calibration using bulk tests. *Advanced Powder Technology*, 30 (4), 732–750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.01.003>.

8. Lupo, M., Sofia, D., Barletta, D., & Poletto, M. (2019). Calibration of DEM Simulation of Cohesive Particles. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 379–384. doi: <https://doi.org/10.3303/CET1974064>.

9. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., & Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1), 95–104.

10. Aliiev, E., & Lupko, K. (2021). Prerequisites for the creation of a mechatronic system of indented cylinders for the separation of fine seeds. *Scientific Horizons*, 24 (3), 75–86. doi: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(3\).2021.75-86](https://doi.org/10.48077/scihor.24(3).2021.75-86).
11. Shevchenko, I., Aliiev, E., Viselga, G., & Kaminski, J. R. (2021). Modeling separation process for sunflower seed mixture on vibro-pneumatic separators. *MECHANIKA*, 27 (4), 311–320. doi: <https://doi.org/10.5755/j02.mech.27647>.
12. Li, Y. M., Chandio, F. A., Ma, Z., Lakhari, I. A., Sahito, A. R., & Ahmad, F. (2018). Mechanical strength of wheat grain varieties influenced by moisture content and loading rate. *Int J Agric & Biol Eng.*, 11 (4), 52–57.
13. Mohammad Reza Seifi & Reza Alimardani. (2010). The moisture content effect on some physical and mechanical properties of corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science Archives*, 2 (4), 125–134. doi: <https://doi.org/10.5539/jas.v2n4p125>.
14. Yaropud, V., Honcharuk, I., Datsiuk, D., & Aliiev, E. (2022). The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, XXXIII (1), 199–208. doi: <https://doi.org/10.15159/jas.22.08>.

ISSN print 2786-7765 ISSN on-line 2786-7773
<https://doi.org/10.37204/2786-7765>

**Інститут механіки та автоматки агропромислового
виробництва
Національної академії аграрних наук України**

Загальнодержавний збірник

**МЕХАНІКА ТА АВТОМАТИКА
АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

Випуск 2 (116)

Глеваха – 2023

Збірник засновано в 1965 році. Починаючи з 44-го випуску (1979 р.), збірник зареєстровано в Міжнародному центрі серійних видань (ISSN International Centre, Paris, France), а з 2019 року – має власну електронну версію, яку розміщено на офіційному веб-сайті: <https://journal.imaar.org.ua>. Видання розміщується, реферується та індексується в міжнародних наукометричних базах, системах і репозитаріях: Google Scholar (США), CrossRef (США), ResearchBib (Канада) та Index Copernicus (Польща).

Засновник видання – Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України.

Періодичність видання – два випуски на рік.

Тематична спрямованість видання – узагальнення результатів наукових досліджень у сфері інноваційного розвитку агропромислового виробництва України та світу, зокрема з питань: створення технічних засобів нового покоління із системами автоматизації контролю та управління їхніми робочими органами та режимами роботи, розроблення енерго- та ресурсоощадних технологічних процесів екологічно безпечного виробництва сільськогосподарської продукції на основі новітніх технічних засобів із використанням інформаційно-комунікаційних систем, розвитку наукових основ ефективного використання енергії поновлюваних та альтернативних джерел.

Збірник включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б» (наказ МОН України від 17.03.2020 р. № 409, зі змінами від 27.04.2023 р. № 491) (технічні науки; спеціальності: 133-Галузеве машинобудування; 141-Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка).

Збірник розміщено на репозитарному зберіганні Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського та представлено на інформаційному порталі в розділі «Наукова періодика України».

Рекомендовано до друку згідно з рішенням вченої ради ІМА АПВ НААН (протокол №12 від 06 жовтня 2023 року).

Свідоцтво про державну реєстрацію
Серія КВ № 25400-15340 ПР від 11.11.2022 р.

Механіка та автоматика агропромислового виробництва : загальнодержавний збірник / ІМА АПВ НААН; за заг. ред. В. В. Адамчука. Глеваха, 2023. Вип. 2 (116). 268 с.

Національна редакційна колегія

Головний редактор – д.т.н., проф., академік НААН В. В. Адамчук
Заступник головного редактора – к.т.н. М. І. Грицишин
Відповідальний секретар – провідний інженер Н. М. Коньок

Члени редакційної колегії:

к.т.н. А. М. Борис
д.т.н., проф. В. В. Братішко
д.т.н., проф., академік НААН В. М. Булгаков
к.т.н. М. О. Василенко
д.т.н. Ю. Г. Вожик
д.т.н., проф. Г. А. Голуб
к.т.н. В. І. Днесь
к.т.н. О. Ф. Довбненко
к.т.н. Р. Б. Кудринський
к.т.н. В. Ф. Кузьменко
д.т.н., проф. С. В. Кюрчев
д.с.-г.н., проф., академік АТНУ В. Г. Лисанюк
д.т.н., проф. В. П. Лисенко
д.т.н., проф. В. Г. Мироненко
д.т.н., проф., чл.-кор. НААН В. Т. Надикто
к.е.н. Н. М. Перепелиця
д.т.н. С. П. Погорілий
к.т.н. В. Г. Присяжний
к.т.н. В. В. Ратушний
к.т.н. І. Ф. Савченко
к.е.н. Н. В. Сергєєва
д.т.н. С. П. Степаненко
к.т.н. В. В. Ткач
к.т.н. В. М. Третьак
д.т.н., проф., академік АЕНУ В. С. Федорейко
д.т.н., проф., академік НААН М. І. Черновол

Зарубіжні члени редакційної колегії:

д.т.н., проф. А. Аболтінш (Латвія)
к.т.н., проф. В. І. Адамчук (Канада)
д.т.н., проф., академік АСГН Республіки Казахстан В. А. Астаф'єв (Казахстан)
д.т.н., проф., академік БАН Х. Белоєв (Болгарія)
д.т.н. проф. С. Івановс (Латвія)
д.т.н., проф. М. Коренко (Словаччина)
д.т.н., проф. Я. Новак (Польща)
д.т.н., проф. Ю. Ольт (Естонія)
д.т.н., проф. С. Паскуцці (Італія)
д.т.н., проф. Д. Степонавічюс (Литва)

Адреса редколегії:

11/1, вул. Вокзальна, смт Глеваха, Фастівський район, Київська область, 08631, Україна
Тел.: +380662300083

E-mail: zbir.imesg@gmail.com
Сайт: <https://journal.imaap.org.ua>

National Editorial Board

Editor-in-Chief – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAAS V. V. Adamchuk
Deputy Chief Editor – Candidate of Technical Sciences M. I. Gritsyshyn
Responsible secretary – leading engineer N. M. Konyok

Editorial Board Members:

Candidate of Technical Sciences A. M. Boris
Doctor of Technical Sciences, Professor V. V. Bratishko
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAAS V. M. Bulgakov
Candidate of Technical Sciences M. O. Vasilenko
Doctor of Technical Sciences Yu. G. Vozhik
Doctor of Technical Sciences, Professor G. Golub
Candidate of Technical Sciences V. I. Dnes
Candidate of Technical Sciences O. F. Dovbnenko
Candidate of Technical Sciences R. B. Kudrynetskyi
Candidate of Technical Sciences V. F. Kuzmenko
Doctor of Technical Sciences, Professor S. V. Kiurchev
Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Academy of Technological Sciences of Ukraine V. G. Lysaniuk
Doctor of Technical Sciences, Professor V. P. Lysenko
Doctor of Technical Sciences, Professor V. G. Myronenko
Doctor of Technical Sciences, Professor, Corr. of NAAS V. T. Nadykto
Candidate of Economic Sciences N. M. Perepelytsya
Doctor of Technical Sciences S. P. Pohorilyy
Candidate of Technical Sciences V. G. Prisyazhny
Candidate of Technical Sciences V. V. Ratushny
Candidate of Technical Sciences I. Savchenko
Candidate of Economic Sciences N. V. Serhieieva
Doctor of Technical Sciences S. P. Stepanenko
Candidate of Technical Sciences V. V. Tkach
Candidate of Technical Sciences V. M. Tretyak
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine V. S. Fedoreyko
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAAS M. I. Chernovol

Foreign members of the Editorial Board:

Doctor of Technical Sciences, Professor A. Aboltins (Latvia)
Candidate of Technical Sciences, Professor V. I. Adamchuk (Canada)
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Agricultural Sciences Academy of the Republic of Kazakhstan V. A. Astafyev (Kazakhstan)
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of BAS H. Beloev (Bulgaria)
Doctor of Technical Sciences, Professor S. Ivanovs (Latvia)
Doctor of Technical Sciences, Professor M. Korenko (Slovakia)
Doctor of Technical Sciences, Professor J. Nowak (Poland)
Doctor of Technical Sciences, Professor Ju. Olt (Estonia)
Doctor of Technical Sciences, Professor S. Pascuzzi (Italy)
Doctor of Technical Sciences, Professor D. Steponavičius (Lithuania)

Address of Editorial Board:

11/1 Vokzalna Street, Glevakha-1, Fastiv District, Kyiv Region, 08631, Ukraine
Tel.: +380662300083

E-mail: zbir.imesg@gmail.com

Website: <https://journal.imaap.org.ua>

ЗМІСТ

**Механіко-технологічні процеси, робочі органи
та машини в АПВ**

1. Адамчук В. В., Пономар Ю. В., Насонов В. А., Корнюшин В. М., Сідий М. О. Розроблення комбінованого агрегата для смугового обробітку ґрунту.....	9
2. Вольський В. А., Коцюбанський Р. В. Конструкційно-технологічні особливості сучасних комбінованих знарядь для подрібнення рослинних решток одночасно з обробітком ґрунту та перспективи їх розвитку.....	16
3. Булигіна М. Є., Булигін С. Ю. Деградація ґрунтів – результат впливу антропогенних чинників	25
4. Адамчук В. В., Погорілий С. П., Присяжний В. Г. Ефективність використання технічних засобів на внесенні органічних добрив.....	38
5. Ратушний В. В., Вітрух П. І., Косовець Ю. В. Експериментальне обґрунтування параметрів сушіння насіння в процесі пошарової обробки насіння.....	44
6. Onyshchenko Borys, Onyshchenko Vladimir Experimental explore of the impact of MF 9108 VE planter settings on corn yield (Експериментальне дослідження впливу налаштувань сівалки MF 9108 VE на врожайність кукурудзи)	52
7. Савченко І. Ф., Рихлівський П. А., Присяжний В. Г. Обґрунтування перспективних методів боротьби з бур'янами в органічному землеробстві.....	59
8. Анеляк М. М., Кузьмич А. Я., Коновал О. О. Дослідження процесу обмолоту хлібної маси в робочому зазорі барабана-деки	68
9. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Головач І. В., Ружило З. В., Троханяк О. М. Дослідження травмування сипкого матеріалу агропромислового виробництва робочими органами гнучких гвинтових конвеєрів	77
10. Степаненко С. П., Анеляк М. М., Кузьмич А. Я., Швидя В. О., Волик Д. А., Коновал О. О., Попадюк І. С. Дослідження впливу параметрів та режимів роботи обладнання на ступінь пошкодження зерна в технологічних лініях для його очищення.....	88
11. Волик Д. А., Попадюк І. С., Степаненко С. П. Аналіз конструкцій та перспективи розвитку технічних засобів для розділення насіння за густиною	100
12. Котов Б. І., Степаненко С. П., Калініченко Р. А., Грушецький С. М., Рудь А. В. Математичне моделювання процесу вібраційного сушіння з урахуванням повздожнього переміщення зернового матеріалу	110
13. Грищенко В. О., Котов Б. І., Степаненко С. П. Теоретичне дослідження проточного зволожувача повітря з ротаційним розпилювачем води.....	120
14. Булгаков В. М., Будзанівський М. І. Результати експериментальних досліджень очисника головок коренеплідних культур від залишків гички на корені	129

15. Алієв Е. Б., Лінко М. О. Обґрунтування конструкційних параметрів формувальної насадки експандера кормів.....	143
16. Павленко С. І. Обґрунтування доцільності використання технічних засобів попереднього формування буртів компостних сумішей.....	153
17. Василенко М. О., Буслаєв Д. О., Калінін О. Є., Кононогов Ю. А., Батуревич Є. О. Обґрунтування матеріалів для змінних елементів робочих органів технічних засобів для обробітку ґрунту.....	164
Енергетика, енергетичні засоби, відновлювані джерела енергії та електротехнології виробничих процесів	
18. Погорілий С. П., Присяжний В. Г., Коновалов Д. В., Мірний В. Ю., Кухарчук О. В. Дослідження процесу агрегування технологічного модуля з мобільним енергетичним засобом типу «Автотрактор».....	169
19. Довбнєнко О. Ф. Техніко-технологічні аспекти застосування системи очищення повітря у тваринницьких приміщеннях.....	176
20. Третяк В. М., Говоров О. Ф. Щодо можливості використання методів геофізичної електророзвідки для поточного контролю якості обробітку ґрунту.....	187
Інженерія машинних систем, автоматизація та інтелектуалізація агропромислового виробництва	
21. Грицишин М. І., Перепелиця Н. М. Розвиток високотехнологічного агропромислового виробництва в Україні.....	194
22. Борис А. М., Савченко І. Ф., Рихлівський П. А., Усік О. І., Галай В. С. Аналіз використання систем автоматичного керування на знищенні бур'янів в умовах органічного вирощування овочевих та просапних культур.....	202
23. Вожик Ю. Г., Швидя В. О., Панасюк В. І., Вітрух П. І., Корнюшин В. М. Дослідження структури повітряного потоку від гвинта мультикоптерного обприскувача.....	213
24. Мироненко В. Г., Жук Т. С., Іващенко Ю. А. Інформаційне забезпечення рослинництва на основі зондування поверхні поля безпілотними літальними апаратами.....	220
25. Кудринєцький Р. Б., Днесь В. І., Крупич С. О., Чухрай В. Є., Левчук О. В. Алгоритм узгодження параметрів матеріально-технічної бази для зберігання зерна.....	226
26. Барабаш Р. І., Кудринєцький Р. Б., Шарибура А. О., Рис В. І. Сумісність технологічних процесів технічного обслуговування тракторів ХТЗ-16131.....	234
27. Третяк В. М., Третяк М. В. Обґрунтування конструкції робочих органів бойкового типу машин гуманітарного розмінування земель сільськогосподарського призначення.....	243
Ювілеї	251
Пам'ятні дати	263

CONTENTS

**Mechanical and technological processes, working bodies
and machines in agricultural production**

1. Adamchuk V. V., Ponomar Y. B., Nasonov V. A., Korniyushyn V. M., Sidiy M. O. Development of a combined unit for strip tillage.....	9
2. Volsky V. A., Kotsyubansky R. V. Structural and technological features of existing combined implements for grinding plant residues simultaneously with soil cultivation and prospects for their development	16
3. Bulygina M. E., Bulygin S. Yu. Soil degradation – the result of anthropogenic factors	25
4. Adamchuk, V. V., Pogorilyy S. P., Prysyzhnyi V. G. Efficiency of using technical equipment in the application of organic fertilizers	38
5. Ratushnyy V. V., Vitrukch P. I., Kosovets Yu. V. Experimental substantiation of seed drying parameters in the process of layer-by-layer processing of seeds	44
6. Onyshchenko Borys, Onyshchenko Vladimir Experimental explore of the impact of MF 9108 VE planter settings on corn yield.....	52
7. Savchenko I. F., Rykhlivskyi P. A., Prysyzhnyi V. G. Substantiation of promising weed control methods in organic farming.....	59
8. Aneliak M. M., Kuzmych A. Ya., Konoval O. O. Study of the threshing process of grain mass in the working gap of the drum deck	68
9. Adamchuk V. V., Bulgakov V. M., Holovach I. V., Ruzhylo Z. V., Trokhaniak O. M. Study of injury of loose material of agro-industrial production by working bodies of flexible screw conveyors.....	77
10. Stepanenko S. P., Anelyak M. M., Kuzmich A. Ya., Shvidya V. O., Volyk D. A., Konoval O. O., Popadyuk I. S. Study of the influence parameters and operating modes of equipment on the degree of grain damage in processing lines for its cleaning	88
11. Volyk D. A., Popadyuk I. S., Stepanenko S. P. Analysis of constructions of technical means for separating seeds by density	100
12. Kotov B. I., Stepanenko S. P., Kalinichenko R. A., Hrushetskiy S. M., Rud A. V. Mathematical modeling of vibration drying process taking into account the longitudinal movement of grain material	110
13. Hryshchenko V. O., Kotov B. I., Stepanenko S. P. Theoretical study of a flow-through humidifier with a rotary water spray	120
14. Bulgakov V. M., Budzanivskyi M. I. Results of experimental studies of the head cleaner of root crops from the remnants of the gizzard on the root.....	129
15. Aliiev E. B., Linko M. O. Justification of the design parameters of the forming nozzle of the fodder expander.....	143

16. Pavlenko S. I. Substantiation of the feasibility of using technical means of preliminary formation of piles of compost mixtures	153
17. Vasylenko M. O., Buslaiev D. O., Kalinin O. Ye., Kononogov Yu. A., Baturevych Ye. O. Substantiated materials for variable elements of parts of tillers	164
Energy, energy means, renewable energy sources and electrical technologies for production processes	
18. Pogorilyy S. P., Prysyzhnyi V. G., Konovalov D. V., Mirnyi V. Y., Kukharchuk O. V. Research of the process of a technological module aggregation with a mobile energy vehicle of the “Autotractor” type	169
19. Dovbnenko O. F. Technical and technological aspects of the use of the air purification system in livestock premises	176
20. Tretyak V. M., Govorov O. F. On the possibility of using the methods of geophysical electrical exploration for current control of the quality of soil processing	187
Engineering of machine systems, automation and intellectualization of agricultural production	
21. Grytsyshyn M. I., Perepelitsa N. M. Development of high-tech agricultural production in Ukraine	194
22. Boris A. M., Savchenko I. F., Rykhlivskiy P. A., Usik O. I., Galai V. S. Analysis of the use of automatic control systems for the destruction of weeds in the conditions of organic cultivation of vegetable and row crops.....	202
23. Vozhyk Yu. G., Shvydia V. O., Panasyuk V. I., Vitrukh P. I., Korniyushyn V. M. Study of the structure of the air flow from the propeller of a multicopter sprayer.....	213
24. Myronenko V. G., Zhuk T. S., Ivashchenko Yu. A. Information support of crop production based on sensing the field surface by unmanned aerial vehicles.....	220
25. Kudrynetskyi R., Dnes V., Krupych S., Chukhrai V., Levchuk O. Algorithm for coordinating the material and technical base parameters for grain storage	226
26. Barabash R. I., Kudrynetskyi R. B., Sharybura A. O., Rys V. I. Compatibility of technological processes for maintenance of HTZ-16131 tractors.....	234
27. Tretyak V. M., Tretyak M. V. Justification of the design of the working bodies of combat-type humanitarian demining machines for agricultural lands	243
Anniversaries	251
Memorable dates	263