УДК 631.361.025/.027 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.85-90

В.М. Зубко, проф., д-р техн. наук
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна
Є.М. Омельченко
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
e-mail: vladyslav.zubko@pdau.ua

Теоретичні основи функціонування машини для підбирання, накопичення та транспортування тюків

Запропоновано функціональну модель технологічного процесу заготівлі сіна і соломи, яка охоплює операції пошуку, орієнтації, захвату, транспортування, накопичення та вивантаження тюків. Розроблено математичні залежності для визначення тривалості робочого циклу, продуктивності машини, процесу орієнтації робочого органу, ймовірності захоплення тюків та енергетичних показників функціонування системи. Наведено аналітичні залежності, що описують вплив геометричних параметрів тюків, швидкості руху агрегату, відстані між тюками та параметрів системи орієнтації на ефективність роботи машини. Встановлено, що найбільший вплив на продуктивність і енергоємність процесу мають швидкість руху агрегату, параметри механізму орієнтації, кінематика захоплення та місткість накопичувальної платформи. Отримані результати можуть бути використані як теоретична основа для подальшого обґрунтування конструктивних параметрів машин для механізації процесів підбирання, накопичення, транспортування та вивантаження тюкованої продукції.
тюки, підбирання тюків, платформа для підбирання тюків, орієнтація тюків, продуктивність, затрати енергії, витрати палива

Постановка проблеми. Розвиток тваринництва в Україні супроводжується завданням заготівлі сухих кормів та матеріалу для підстилки. Обґрунтування технологічних ліній для відповідних процесів повинні враховувати наступні фактори: пакувальна форма (рулон або тюк); питома вага матеріалу, ступінь ущільнення пакувальних форм та агротехнічні строки проведення операцій.

Однією з основних задач є якомога швидше звільнити поверхню від сіна або соломи за умови мінімізації ущільнення поверхні поля. Це створить передумови для росту наступної генерації кормової культури або можливість для підготовки поля під сівбу наступної культури.

Суху масу (сіно або солому) формують у тюк або рулон. При формуванні тюка необхідно обґрунтувати машини в технологічній лінії таким чином, щоб забезпечити процес підбору тюків у відповідності напряму виконання попередньої операції. Працюючи, прес-підбирач викладає тюк на поверхню поля таким чином, що він виходить довгою стороною прямокутника по ходу руху машинного агрегату.

В сучасних умовах функціонування аграрного виробництва актуальною постає задача планування ефективної технологічної лінії виконання технологічного процесу під час вирощування та збирання культур та побічної продукції. У процесі заготівлі сіна постає задача орієнтації тюка на полі таким чином, щоб оптимізувати його захват бральним пристроєм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При заготівлі сіна відразу після скошування активізується процес сушіння. Мірою висушування скошеної маси виникає голодний обмін, який обґрунтовується перевагою розпадання органічної речовини над синтезом. При умові тривалого голодного обміну показник втрати зростає до 10–15%. Для мінімізації втрат важливо максимально швидко довести вологість скошеної трави до рівня меншого за 35%. [1]. Відповідно, процес тюкування та вивозу з поля повинен

© В.М. Зубко, Є.М. Омельченко, 2026

бути виконаний в мінімальні строки. Водночас при заготівлі соломи слід також забезпечити звільнення поля від соломи, адже між збиранням пшениці і сівбою ріпаку слід забезпечити мінімальні строки.

Технології аграрного виробництва у розвинених країнах Європи та Північної Америки є дуже передовими, причому більшість виробничих процесів повністю механізовані та автоматизовані [2].

Для оптимізації процесу заготівлі сіна та соломи використовують самозавантажувальні тюковози. Їх перевага у технологічній лінії полягає у самозавантаженні, з подальшим транспортуванням, та саморозвантаженні [3].

Водночас технологія заготівлі сіна і соломи у тюках також часто стикається з питанням орієнтації тюка на полі. Тюк, маючи прямокутну форму, виходить з прес-підбирача довгою стороною вздовж траєкторії руху підбирача. Частина тюкопідбирачів працює з іншим кутом укладання тюка на полі (відповідно, короткою стороною прямокутника вздовж траєкторії руху підбирача)

За умови високої ефективності завантаження, їх складні конструкції та висока вартість значно обмежують їхнє впровадження [4].

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка теоретичних основ функціонування підбирачів великогабаритних прямокутних тюків шляхом формалізації технологічного процесу, побудови його функціональної моделі та отримання математичних залежностей, що описують основні параметри роботи машини.

Виклад основного матеріалу. Одним із складових етапів заготівлі кормів є підбирання, накопичення та транспортування тюків до місця перевалки або зберігання. Операції після формування тюка залишаються суттєвим джерелом затрат часу, пального та людських ресурсів. За результатами проведення тюкованої біомаси, ефективність функціонування технологічної лінії значною мірою визначається узгодженістю роботи прес-підбирача, системи підбирання, накопичення та транспортування [5, 6, 7, 8].

Сучасні машини для роботи з тюками виконують сукупність взаємопов'язаних технологічних дій:

– пошук та ідентифікацію тюка;

– підведення робочого органу до тюка;

– захоплення тюка;

– його переміщення на накопичувальну платформу;

– вивантаження у місці складування.

У загальному вигляді технологічний процес підбирання тюків можна представити множиною функціональних операцій:

$$\mathrm{P} = \{\mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2, \mathrm{P}_3, \mathrm{P}_4, \mathrm{P}_5, \mathrm{P}_6, \mathrm{P}_7, \mathrm{P}_8\}, \quad (1)$$

де P_1 – рух агрегату до тюка; P_2 – орієнтація робочого органу; P_3 – захоплення тюка; P_4 – транспортування тюка на платформу; P_5 – укладання тюка; P_6 – накопичення тюків; P_7 – транспортування пакета; P_8 – вивантаження.

Відповідно до принципів системного аналізу, технологічної лінії заготівлі кормів доцільно розглядати як сукупність: матеріального, енергетичного та інформаційного потоків. Матеріальним потоком є тюк кормової маси або соломи, енергетичним – потужність, що передається від енергетичного засобу до робочих органів, а інформаційним – сигнали про просторове положення тюка та стан механізмів машини.

До основних вхідних параметрів належать m_b – маса тюка, кг; l_b – довжина тюка, м; b_b – ширина тюка, м; h_b – висота тюка, м; S_b – відстань між сусідніми тюками, м; V_a – швидкість руху агрегату, м/с.

Об'єм тюка визначається за наступним виразом:

$$V_{b=} l_b \cdot b_b \cdot h_b, \quad (2)$$

де V_b – об'єм тюка, м^3; l_b – довжина тюка, м; b_b – ширина тюка, м; h_b – висота тюка, м.

Середня густина тюка дорівнює:

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b}, \tag{3}$$

де ρ_b – середня щільність тюка, кг/м^3.

Зі збільшенням густини тюка підвищується ефективність організації транспортного процесу та складування, проте одночасно зростають навантаження на робочі органи машини [6, 9].

Основною характеристикою ефективності процесу є тривалість циклу роботи машини:

$$T_c = t_r + t_o + t_z + t_p + t_u + t_t + t_v, \tag{4}$$

де t_r – час під'їзду до тюка, с; t_o – час орієнтації робочого органу, с; t_z – час захоплення тюка, с; t_p – час переміщення тюка на платформу, с; t_u – час укладання тюка, с; t_t – час транспортного переміщення пакета тюків, с; t_v – час вивантаження пакета тюків, с.

Продуктивність машини за показником кількості тюків визначається за наступним виразом:

$$W_n = \frac{3600 \cdot n}{T_c}, \tag{5}$$

де n – кількість тюків у пакеті.

Масова продуктивність машини дорівнює:

$$W_m = W_n \cdot m_b. \tag{6}$$

Оскільки операція підбирання є циклічною, відповідно продуктивність значною мірою залежить від середньої відстані між тюками на поверхні полі. Приймаємо умову рівномірного розташуванні тюків, тоді час руху між ними можна визначити за наступним виразом:

$$t_r = \frac{S_b}{V_a}. \tag{7}$$

Відповідно тривалість одного циклу дорівнює:

$$T_c = \frac{S_b}{V_a} + t_o + t_z + t_p + t_u + t_t + t_v. \tag{8}$$

Після проведення перетворень:

$$W_n = \frac{3600 \cdot n}{\frac{S_b}{V_a} + t_o + t_z + t_p + t_u + t_t + t_v}. \tag{9}$$

Отримана залежність вказує на те, що збільшення робочої швидкості руху агрегату сприяє зростанню продуктивності лише до певної межі, після якої починають зростати втрати часу на позиціонування та захват тюка.

Для аналізу процесу підбирання тюка з поверхні поля необхідно розглянути кінематику взаємодії машини з тюком. Нехай координати центра тюка відносно трактора задається як вектор у площині:

$$r_b = (x_b, y_b), \tag{10}$$

де x_b, y_b – координати центра тюка в системі координат агрегату.

Відповідно відстань від осі руху агрегату до центра тюка визначається:

$$R = \|r_b\| = \sqrt{x_b^2 + y_b^2}. \tag{11}$$

Кут орієнтації робочого органу дорівнює:

$$\varphi = arctan\left(\frac{y_b}{x_b}\right). \tag{12}$$

Таким чином, для забезпечення гарантованого захвату тюка система орієнтації повинна виконувати умову:

$$|\varphi| \leq \varphi_{max}, \tag{13}$$

де $\varphi_{\max}$ – максимально допустимий кут відхилення робочого органу, град.

Особливий інтерес становить випадок асиметричного розташування підбирального пристрою відносно поздовжньої осі енергетичного засобу. Тоді робоча ширина захвату дорівнює:

$$\mathrm{B} = \mathrm{B_o} + \mathrm{e}, \tag{14}$$

де B_0 – конструктивна ширина захвату; e – величина бокового зміщення робочого органу.

Імовірність успішного захвату тюка можна виразити функцією:

$$P = f\left(B, S_b, \sigma_y\right), \tag{15}$$

де σ_y – середньоквадратичне відхилення поперечного розташування тюків відносно траєкторії руху агрегату.

Енергетичний аналіз процесу показує, що потужність, необхідна для переміщення тюка робочими органами, складає:

$$N = \frac{F_t \cdot v_t}{\eta}, \tag{16}$$

де F_t – тягове або штовхальне зусилля, Н; v_t – швидкість переміщення тюка, м/с; η – ККД механізму.

При транспортуванні тюка по напрямних сила опору руху складає:

$$F_t = f \cdot m_b \cdot g, \tag{17}$$

де f – коефіцієнт опору переміщенню; g – прискорення вільного падіння, м/с^2.

Тоді потужність процесу транспортування складає:

$$N = \frac{f \cdot m_b \cdot g \cdot v_t}{\eta}. \tag{18}$$

Під час накопичення тюків формується пакет масою

$$M_p = n \cdot m_b, \tag{19}$$

де M_p — маса пакета тюків, кг; n – кількість тюків у пакеті.

Умова забезпечення стійкості пакета:

$$x_c \leq \frac{L_p}{2}, \tag{20}$$

де x_c – координата центра мас пакета; L_p – довжина опорної поверхні, м.

Висновки. Структурний аналіз показав, що найбільший вплив на продуктивність та енергоємність машини мають:

– швидкість руху агрегату;
– відстань між тюками;
– маса тюка;
– параметри системи орієнтації;
– кінематика механізму захоплення;
– місткість накопичувальної платформи.

Технологічна лінія заготівлі сіна є складною багатопараметричною системою, ефективність якої визначається взаємодією кінематичних, силових та часових параметрів. Отримані залежності є теоретичною основою для подальшого обґрунтування конструктивної схеми машини та побудови математичних моделей процесів орієнтації, захвату, укладання і вивантаження тюків.

Список літератури

1. Кузьменко Ф., Холодюк О., Максіменко В. Сушіння, тюкування, в'язання: технічні моменти. *Агробізнес сьогодні*. 2021. 17 червня. С. 11–12. http://agro-business.com.ua (дата звернення: 15.06.2026)
2. Zhao Y, Diao P, Lu Z, Li X, Li S, Wang S. Design and Test of a Traction Side-Pull Square Straw Bale Pick-Up-and-Stack Truck. *Agriculture*, 2024, 14(11):1978. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14111978
3. Борзненко, В. & Мереф'янський, Г. Тюкування і тюкоперевезення. *Агробізнес сьогодні*. 2020. 16 березня. С. 5. http://agro-business.com.ua (дата звернення: 16.06.2026)
4. Sharma A., Brar A.S. Investigation on baler technology for ex situ paddy residue biomass management with energy consumption analysis for wheat establishment. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2022. 19. P. 6267–6284.
5. Kemmerer B., Liu J. Large Square Baling and Bale Handling Efficiency – A Case Study. *Agricultural Sciences*. 2012. Vol. 3. No. 02. P. 178–183. DOI: https://doi.org/10.4236/as.2012.32020
6. Guerrieri A.S., Anifantis A.S., Santoro F., Pascuzzi S. Study of a Large Square Baler with Innovative Technological Systems that Optimize the Baling Effectiveness. *Agriculture*. 2019. 9(5): P. 86.
7. Kemmerer B., Liu J. Comparison of Large Square Bale Handling Options. *ASABE Conference Proceedings.* 2011. Louisville, Kentucky, August 7–10, Paper 1111265.
8. Zhao Y. et al. Design and Test of a Traction Side-Pull Square Straw Bale Pick-Up-and-Stack Truck. *Agriculture*. 2024. 14(11). DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14111978
9. Clark R., Limpert R. Design and Development of the Big Bale Handling System. *SAE Technical Paper* 891821. 1989.

References

1. Kuzmenko, F., Kholodyuk, O. & Maksimenko, V. (2021). Drying, baling, knitting: technical aspects. *Agribusiness Today.* (June 17), 11–12. http://agro-business.com.ua [in Ukrainian].
2. Zhao, Y, Diao, P, Lu, Z, Li, X, Li, S, & Wang, S. (2024). Design and Test of a Traction Side-Pull Square Straw Bale Pick-Up-and-Stack Truck. *Agriculture*, 14(11):1978. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14111978
3. Borznenko, V. & Merefyansky, G. (2020). Baling and bale transportation. *Agribusiness Today* (March 16), 5. http://agro-business.com.ua [in Ukrainian].
4. Sharma, A., & Brar, A.S. (2022). Investigation on baler technology for ex situ paddy residue biomass management with energy consumption analysis for wheat establishment. *Int. J. Environ. Sci. Technol,* 19, 6267–6284.
5. Kemmerer, B., & Liu, J. (2012). Large Square Baling and Bale Handling Efficiency – A Case Study. *Agricultural Sciences*, 3, 02, 178–183. DOI: https://doi.org/10.4236/as.2012.32020
6. Guerrieri, A.S., Anifantis, A.S., Santoro, F., & Pascuzzi, S. (2019). Study of a Large Square Baler with Innovative Technological Systems that Optimize the Baling Effectiveness. *Agriculture,* 9(5):86.
7. Kemmerer, B., & Liu, J. (2011). Comparison of Large Square Bale Handling Options. *ASABE Conference Proceedings.* Louisville, Kentucky (August 7–10), Paper 1111265.
8. Zhao, Y. et al. (2024). Design and Test of a Traction Side-Pull Square Straw Bale Pick-Up-and-Stack Truck. *Agriculture*, 14(11). DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14111978
9. Clark, R., & Limpert, R. (1989). Design and Development of the Big Bale Handling System. *SAE Technical*. Paper 891821.

Vladyslav Zubko, Prof., DSc.
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine
Yevgen Omelchenko
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Theoretical Foundations of the Operation of a Machine for Picking Up, Storing, and Transporting Bales

This article examines the theoretical foundations of the operation of a machine for collecting large rectangular bales of forage and by-products of plant origin. The relevance of improving the technological process of hay and straw harvesting is substantiated, taking into account the requirements to reduce the duration of field operations, lower energy and fuel consumption, and increase the productivity of machinery. A functional model of the technological process is proposed, covering the operations of searching for, orienting, grasping, transporting, accumulating, and unloading bales. Mathematical relationships have been developed to determine the duration of the work cycle, machine productivity, the orientation process of the working body, the probability of bale grasping, and the energy performance indicators of the system. Analytical relationships are presented that describe the influence of bale geometric parameters, the unit's travel speed, the distance between bales, and the

orientation system's parameters on the machine's operational efficiency. It has been established that the machine's travel speed, the parameters of the orientation mechanism, the kinematics of bale pickup, and the capacity of the storage platform have the greatest impact on the process's productivity and energy consumption. The results obtained can serve as a theoretical basis for further justification of the design parameters of machines for mechanizing the processes of picking, accumulation, transportation, and unloading of baled products.
bales, bale handling, bale handling platform, bale orientation, productivity, energy consumption, fuel consumption

Одержано (Received) 15.06.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 22.06.2026*
Дата публікації (Publication Date) 30.06.2026 *Прийнято до друку (Approved) 24.06.2026*

УДК 622.24.08 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.90-103

О. В. Русаченко
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна
І. В. Шепеленко, проф., д-р техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
О. О. Слабий, доц., канд. техн. наук, **Я. С. Гриджук,** проф., докт. техн. наук
ДВНЗ «Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу», м. Івано-Франківськ, Україна
І. В. Дмитрів, доц., канд. техн. наук
НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна
e-mail: rav@olis-group.com.ua, kntucpfzk@gmail.com, burewisnyk@gmail.com, jaroslav.gridzhuk@gmail.com, ihor.v.dmytriv@lpnu.ua

Вивчення зносу навантаженого ковша, облицьованого гумотканними матами при навантаженні сипучих матеріалів

Представлена робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі, пов'язаної з підвищенням експлуатаційного ресурсу та зниженням динамічної навантаженості робочих органів важких фронтальних навантажувачів, які функціонують в умовах інтенсивної взаємодії з великофракційною кусковою гірською масою низької абразивності. Дослідження умов роботи та характеру зносу елементів виконано шляхом чисельного моделювання методом дискретних елементів (DEM) повного кінематичного циклу роботи у програмному комплексі дискретно-елементного моделювання Ansys Rocky 2025 R2. Виявлено критичну зону підвищеного комбінованого зносу в нижній третині задньої стінки, яку слід вирішувати шляхом локального підсилення футерування керамічними елементами або оптимізацією геометрії робочого органу.
ківш навантажувача, метод дискретних елементів (DEM), зношування, футерування, дисперсо армована гумоткана футеровка, Ansys Rocky, дисипація енергії, контактні напруження

Постановка проблеми. В процесі роботи ковші екскаваторів та навантажувачів, що працюють із кусковою гірською породою піддаються інтенсивному ударному навантаженню, абразивному та втомному зносу. Для запобігання їх передчасному виходу з ладу від абразивного зносу на сьогодні широко поширеною практикою є використання захисних змінних плит із зносостійких сталей або з твердосплавним

© О. В. Русаченко, І. В. Шепеленко, О. О. Слабий, Я. С. Гриджук, І. В. Дмитрів, 2026