УДК 631.354.2.028 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.46-53

В.А. Головльов, інж., **О.М. Леженкін,** проф., д-р техн. наук
Таврійський державний агротехнологічний університет ім. Дмитра Моторного, Мелітополь, Україна
e–mail: viktor.holovlov@tsatu.edu.ua, lan2810@ukr.net

Експериментальні дослідження робочого процесу пневмотранспортера обчісаного вороху

У статі наводяться переваги збирання зернових культур методом обчісування на корені з подальшою доробкою обчісаного вороху на стаціонарному пункті в порівнянні з комбайновим збиранням. Збирання цією технологією виконується причіпною збиральною машиною, яка складається з обчісуючого пристрою, ходової частини, транспортуючої системи. Параметри пневмотранспортеру збиральної машини є недостатньо обґрунтовані, тому подальшому наводяться результати експериментальних досліджень технологічного процесу пневмотранспортеру для транспортування обчісаного вороху зернових у причіп – візок, а саме дальність польоту обчісаного вороху в залежності від частоти обертання валу відцентрового вентилятору, питомої подачі вихідного матеріалу та кута нахилу рухомої заслінки.

обчісаний ворох, обчісування рослин, фактори, збиральна машина, пневмотранспортер, експеримент, експериментвльні дослідження

Постановка проблеми. Як доказано багаторічними дослідженнями професора Шабанова П.А [1] збирання зернових культур методом обчісування рослин на корені має багато переваг перед традиційним комбайновим збиранням шляхом зрізування рослин та обмолотом їх у молотарці комбайну. Найбільш доцільно це використовувати цей метод у стаціонарному варіанті, тобто обчісувати рослини в полі з доробкою обчісаного вороху на стаціонарному пункті [2].

Для реалізації цієї технології необхідно мати причіпну збиральну машину з обчісуючими робочими органами, колісний трактор для її агрегатування причіп – візок для збору обчісаного вороху та стаціонарний агрегат для доробки обчісаного вороху.

Якщо розглянути збиральну машину, то вона містить обчісуючий пристрій, шнековий транспортер, шнековий транспортер, та ходову систему [3,4].

Що стосується обчісуючого пристрою то він обґрунтований в достатній мірі в рботі [5].

Але ж пневмотранспортер потребує обґрунтування його конструктивних, кінематичних та технологічних параметрів.

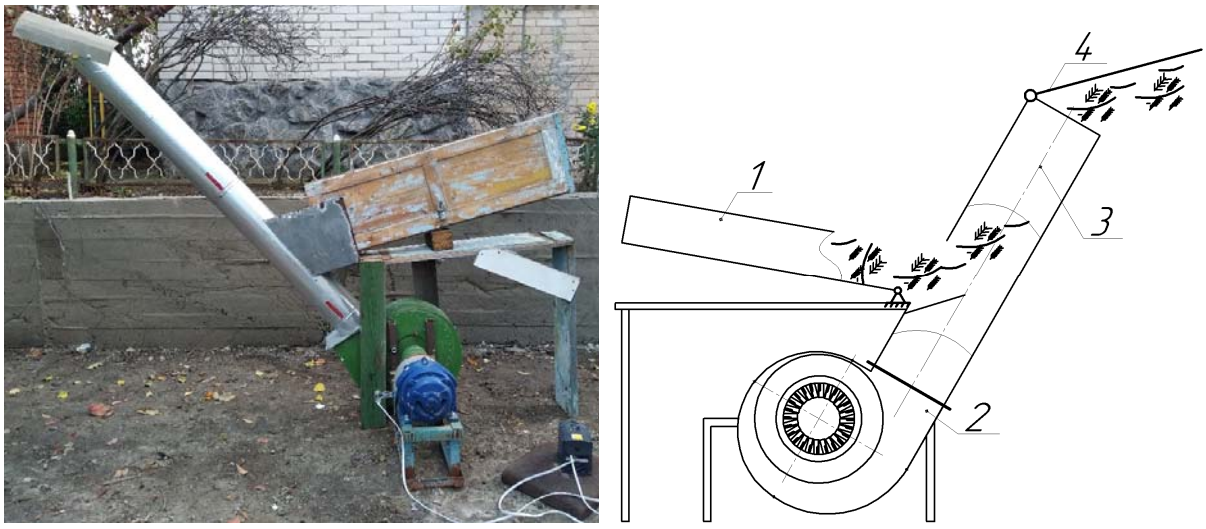
Аналіз останіх досліджнень і публікацій. Теоретичні основи функціонування пневмотранспортерів викладені в роботі [6]. Практичні рекомендації щодо роботи пневмотранспортерів в галузі сільськогосподарського виробництва наведені в роботах [7,8]. Але ж в цих роботах розглянуто питання транспортування зерна. В збиральній машині пневмотранспортер виконує функцію транспортування обчісаного вороху в причіп. Обчісаний ворох по своїм аеродинамічним властивостям суттєво відрізняється від зерна, тому що є чотирьох компонентною сумішшю (вільне зерно, солома, обірвані колоски, полова), тому виникає задача обґрунтування саме пневмотранспортеру обчісаного вороху.

© В.А. Головльов, О.М. Леженкін, 2021

Постановка завдання. Експериментально дослідити роботу пневмотранспортеру з метою побудування регресійної моделі, яка в подальшому може дозволити визначити раціональні параметри та режими функціонування пневмотранспортеру.

Виклад основного матеріалу. Для проведення досліджень було виготовлено експериментальну лабораторну установку технологічну схему якої наведено на рис. 1 б, загальний вид рис. 1 а. Технологічний процес пневмотранспортеру відбувається наступним чином. Обчісаний ворох за допомогою гравітаційного транспортеру 1 дозовано подається до каналу пневмотранспортеру 3, де повітряний потік, який створюється відцентровим вентилятором 2 підхоплює обчісаний ворох і подає його до виходу. Траєкторія руху та дальнвсть польоту вороху залежить від положення рухомої заслінки 4.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням математичної теорії планування експерименту. Після проведення аналізу переваг та недоліків різноманітних планів [9,10,11] був обраний некомпозиційний трьохрівневий план другого порядку Бокса – Бенкіна [12].



а б

1 – гравітаційний транспортер; 2 – відцентровий вентилятор; 3 – пневмотранспортер; 4 – рухома заслінка

Рисунок 1 – Лабораторна установка пневмотранспортеру причіпного збирального модулю: а – загальний вигляд; б – технологічна схема

Джерело: розроблено авторами

Рівняння регресії для даного плану має вид [9]:

$$y = b_0 + \sum_{l<x<k} b_i x_i + \sum_{i} b_{il} x_i + \sum_{l<x<k} b_{ii} x_i^2 , \quad (1)$$

де y – вибіркова оцінка функції відгуку;

b_0, b_i, b_{il}, b_{ii} – коефіцієнти регресії, які є оцінками теоретичних коефіцієнтів;

x_i – незалежні змінні (фактори).

Для оцінки ефективності функціонування пневмотранспортеру була використана функція відгуку, яка характеризує дальність польоту вороху. Така функція відгуку була обрана у зв'язку з необхідністю повноцінного завантаження причепу – візка для збирання обчісаного вороху.

Аналіз факторів дозволив обрати найбільш вагомі показники, а саме частоту обертання відцентрового вентилятора, питому подачу вихідного матеріалу, та кут нахилу рухомої заслінки [13].

Таким чином виконувався повнофакторний експеримент на трьох рівнях, для трьох факторів, який оцінювався однією функцією відгуку.

В загальному вигляді математична моделі має вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (2)$$

де y – функція відгуку, характеризуюча дальність польоту обчісаного вороху;

x_1 – частота обертання валу відцентрового вентилятора;

x_2 – питома подача вихідного матеріалу;

x_3 – кут нахилу рухомої заслінки;

$b_0, b_1, b_2, b_3 ...$ – коефіцієнти регресії.

Використовуючи результати теоретичних досліджень, моделювання та аналізу літературних джерел [14, 15] були визначені границі значень факторів, які приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторами

Рівень і інтервал варіювання факторами	Фактори		
	частота роботи електродвигуна, Гц (частота обертання валу вентилятора, ω рад/с)	подача вихідного матеріалу, q кг/с;	кут нахилу рухомої заслінки, α град.
	x_1	x_2	x_3
Верхній рівень (+)	40 (128)	0,4	20
Основний рівень (0)	35 (107)	0,3	10
Нижній рівень (-)	30 (90)	0,2	0
Інтервал варіювання	5	0,1	10

Джерело: [13]

Для проведення експерименту була складена матриця планування експерименту, у якій нижній рівень позначався (-), верхній (+), основний (0), яка приведена в таблиці 2.

Таблиця 2 – Матриця некомпозиційного трьохрівневого плану другого порядку для трьох факторів

Номер досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0
2	+	+	–	0	–	0	0	+	+	0
3	+	–	+	0	–	0	0	+	+	0
4	+	–	–	0	+	0	0	+	+	0

Продовження таблиці 2

5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+
7	+	+	0	–	0	–	0	+	0	+
8	+	–	0	+	0	–	0	+	0	+
9	+	–	0	–	0	+	0	+	0	+
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+
12	+	0	+	–	0	0	–	0	+	+
13	+	0	–	+	0	0	–	0	+	+
14	+	0	–	–	0	0	+	0	+	+
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Джерело: розроблено авторами

Для проведення розрахунку коефіцієнтів регресії були використані наступні формули [13]:

$$\begin{cases} b_0 = \frac{1}{3}\sum_{n=1}^{N} Y_{0n}; \\ b_i = \frac{1}{8}\sum_{j=1}^{15} x_0 y_j; \\ b_{il} = \frac{1}{4}\sum_{j=1}^{15} x_{ij} x_{lj} y_j; \\ b_{il} = \frac{1}{4}\sum_{j=1}^{15} x_{ij} y_j - \frac{1}{16}\sum_{i=1}^{3}\ \sum_{j=1}^{15} x^2{}_{ij} y_j - \frac{1}{6}\sum Y_0. \end{cases}$$

Після підстановки в формули (3) числових значень функції відгуку були визначені коефіцієнти рівняння регресії :

$b_0 = 3,5;$ $b_{13} = -0,025;$

$b_1 = 0,94;$ $b_{23} = 0,025;$

$b_2 = -0,34;$ $b_{11} = -0,475;$

$b_3 = 0,73;$ $b_{22} = 0,125;$

$b_{12} = 0,05;$ $b_{33} = 0,05;$

Перевірка значущості коефіцієнтів проводилася за критеріями Стьюдента, для чого спочатку була визначена дисперсія відтворюваності $S^2\{y\}$:

$$S^2\{y\} = \frac{S_E}{n_0 - 1} \quad (4)$$

де S_E – дисперсія, яка характеризує помилку досліду;

n_0 – кількість дослідів у центрі плану

Дисперсія, яка характеризує помилку дослідів визначили за формулою

$$S_E = \sum \left(Y_{0n} - \overline{Y}_{0n} \right)^2 \tag{5}$$

Для визначення дисперсії помилок при визначені коефіцієнтів регресії були використані наступні формули [11]:

$$\begin{aligned} S^2\{b_o\} &= \frac{1}{3} S^2\{y\}; \\ S^2\{b_i\} &= \frac{1}{8} S^2\{y\}; \\ S^2\{b_{il}\} &= \frac{1}{4} S^2\{y\}; \\ S^2\{b_{ii}\} &= \frac{13}{48} S^2\{y\}. \end{aligned} \tag{6}$$

Довірчі інтервали були визначені за формулою [11]:

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm t_T S^2\{b_0\}; \\ \Delta b_i &= \pm t_T S^2\{b_i\}; \\ \Delta b_{il} &= \pm t_T S^2\{b_{il}\}; \\ \Delta b_{ii} &= \pm t_T S^2\{b_{ii}\}. \end{aligned} \tag{7}$$

де t_T – критерій Стьюдента.

Критерій Стьюдента визначається за допомогою таблиць. У даному випадку $t_T = 4,3$ [11].

Після розрахунків за формулами (6) та (7) були отримані значення довірчих інтервалів:

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 0,01419; \\ \Delta b_i &= \pm 0,05375; \\ \Delta b_{il} &= \pm 0,01075; \\ \Delta b_{ii} &= \pm 0,01161. \end{aligned}$$

Отримані в результаті розрахунків довірчі інтервали коефіцієнтів b_0, b_i, b_{il}, b_{ii}, порівнюються з числовими значеннями коефіцієнтів регресії. У випадку якщо числове значення коефіцієнта регресії перевищує довірчий інтервал приймається рішення про значущість коефіцієнтів регресії.

У нашому випадку всі коефіцієнти регресії значущі. Тому можемо записати рівняння регресії:

$$\begin{aligned} y = 3,5 + 0,94x_1 + 0,34x_2 + 0,73x_3 + 0,05x_1x_2 - 0,025x_{13} + 0,025x_{23} - \\ -0,475_{11}^2 + 0,125_{22}^2 + 0,05_{33}^2. \end{aligned} \tag{8}$$

Наступним етапом статистичного аналізу була перевірка адекватності отриманої моделі. Адекватність моделі перевірялась за критерієм Фішера. Сутність даної перевірки полягала у тому, що визначалось розрахункове значення F_p, яке порівнювалось з табличним F_T.

Для отриманої моделі розрахункове значення критерія Фішера $F_p = 4,7967$, а табличне $F_T = 19,3$ [11]. Тому можна зробити висновок про адекватність регресійної моделі.

Висновки. У якості факторів були обрані: частота роботи електродвигуна (частота обертання валу вентилятора), подача вихідного матеріалу, кут нахилу рухомої заслінки. Використовуючи результати теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання в середовищі SolidWorks, та аналізу літературних джерел були визначені границі значень факторів. Для проведення експериментальних досліджень була виготовлена експериментальна установка, яка дозволила варіювати значеннями змінних факторів, і тим самим отримувати різноманітні дані дальності польоту обчісаного вороху пшениці в залежності від значень змінних факторів.

Встановлено, що найбільш доцільно використовувати некомпозиційний трьохрівневий план Бокса – Бенкіна для трьох факторів, який дає можливість за даними проведених експериментів отримати математичну модель.

Отримано математичну модель, яка в подальшому дасть можливість встановити раціональні параметри та режими функціонування пневмотранспортеру обчісаного вороху.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії по критерію Стьюдента вказала на те, що всі коефіцієнти значущі.

Перевірка адекватності моделі по критерію Фішера показала, що модель адекватна.

Список літератури

1. Шабанов П.А. Механико-технологические основы обмолота зерновых культур на корню: дис…. д-ра. техн. наук / П.А. Шабанов. Мелитополь. 1988. 336 с.
2. Леженкин А.Н. Методология формирования энерго– и ресурсосберегающей технологии уборки зерновых культур в условиях фермерских хозяйств (на примере Украины): автореф. дис… д-ра. техн. наук : 05.20.01. Москва, 2008. 35 с.
3. Леженкин А. Машина с очесывающим устройством. *Сел. механизатор*. 2004. № 12. С. 2.
4. Причіпна збиральна машина: пат. 98161 Україна: МПК A01D41/08 (2006. 01). № u 2014 08537; заявл. 28.07.2014; опубл. 27.04.015. Бюл. № 8.
5. Голубев И.К. Обоснование основных параметров и режимов работы двухбарабанного устройства для очеса риса на корню: дис… канд. техн. наук / И.К. Голубев. Москва, 1989. 201 с.
6. Калинушкин М. П. Вентиляторные установки. М.: Высшая школа, 1962, 294 с.
7. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин: в 4-х т. ; ред. М. И. Клецкин. Т. 2. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1967. 830 с.
8. Проектування сільськогосподарських машин: навч. посіб. ; за ред. І.М. Бендери. Кам'янець-Подільський, 2010. 640 с.
9. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов . Л.: Колос, 1980. 165 с.
10. Барабащук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике ; под ред. Б. П Креденцер. К.: Техніка, 1984. 200 с.
11. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 60 с.
12. Box G. E. P., Behnken D. W. Home New. The Level for the Study ob Quantitative Variables . *Technometrics*. 1960. V. 2. №4. P. 127-132.

13. Головльов В.А., Леженкін О.М. Методика проведення експерименту робочого процесу пневмотранспортеру обчісаного вороху . *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ. 2020. Вип.20., Т.3. С. 74-79.
14. Математична модель руху часточки обчісаного вороху зернових у повітряному потоці / О.М. Леженкін, В.А. Головльов, О.Ю. Михайленко, М.О. Рубцов . *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ. 2019. Вип.19., Т.3. С. 14-21. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-14-21
15. Головльов В.А., Леженкін О.М. Методика аналітичного визначення швидкості руху часточки обчісаного вороху . *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ. 2019. Вип.19., Т.3. С. 22-28. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-22-28

References

1. Shabanov, P.A. (1988). Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy obmolota zernovykh kultur na kornyu [Mechanical and technological fundamentals of threshing grain crops on the root]. *Doctor's thesis*. Melitopol [in Russian].
2. Lezhenkin, A.N. (2008). Metodologiya formirovaniya energo– i resursosberegayushhej tekhnologii uborki zernovykh kultur v usloviyakh fermerskikh khozyajstv (na primere Ukrainy) [Methodology for the formation of energy- and resource-saving technologies for harvesting grain crops in the conditions of farms (on the example of Ukraine)]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Moscow [in Russian].
3. Lezhenkin, A. (2004). Mashina s ochesyvayushhim ustrojstvom [Stripper machine]. Selskii mekhanizator, no. 4, pp. 27. [in Russian].
4. Pat. 98161 Ukraine, MPK A01D41/08. Prychipna zbyral'na mashyna [Trailed harvester]. No. u 2014 08537; stated. July 28, 2014; has been published April 27, 2015, Bul. No. 23. [in Ukrainian].
5. Golubev, I.K. (1989). Obosnovanie osnovnykh parametrov i rezhimov raboty dvukhbarabannogo ustrojstva dlya ochesa risa na kornyu [Substantiation of the main parameters and operating modes of a two-drum device for harvesting by stripping the rice]. *PhD thesis*. Moscow [in Russian].
6. Kalinushkin, M. P. (1962). *Ventilyatornye ustanovki* [*Fan units*]. Moscow: Vysshaya shkola [in Russian].
7. Spravochnik konstruktora sel`skokhozyajstvennykh mashyn [Reference for agricultural machinery mechanician]. Ed. M. I. Kletskin. Moscow: Mashinostroenie, Vol. 2 (2nd ed.), 1967. 830 p. [In Russian].
8. Proektuvannja sil's'kogospodars'kyh mashyn. Navchal'nyj posibnyk Bendery I.M. [Design of agricultural machinery. Tutorial]. Ed. I.M. Bendery. Kamianets-Podilskyi, 2010. 640 p. [in Ukrainian].
9. Melnikov, S.V., Aleshkin, V.R. & Roshchin, P.M. (1980). *Planirovanie eksperimenta v issledovaniyakh sel`skokhozyajstvennykh proczessov* [*Experiment planning in agricultural process research*]. Leningrad: Kolos [in Russian].
10. Barabashchuk, V. I., Kredentser, B. P. & Miroshnichenko, V. I. (1984). *Planirovanie eksperimenta v tekhnike* [*Planning an experiment in technics*]. Kyiv: Tehnika [in Russian].
11. Spiridonov, A.A. (1981). *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh proczessov* [*Planning an experiment in the research of technological processes*]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
12. Box G. E. P., Behnken D. W. (1960). Home new. The level for the study ob quantitative variables. *Technometrics*, *Vol. 2, 4,* 127-132.
13. Holovlov, V.A., Lezhenkin, O.M. (2020). Metodika provedennya eksperimentu robochogo proczesu pnevmotransporteru obchi`sanogo vorokhu [Method of conducting the experiment of the working process of the pneumatic conveyor of the combed heap]. *Praci Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Proceedings of the Tavria State agrotechnological university*, *Vol.20, 3*, 74-79. [in Ukrainian].
14. Holovlov, V.A., Lezhenkin, O.M., Mikhailenko, O.Y. & Rubtsov, M.O. (2019). Matematichna model` rukhu chastochki obchisanogo vorokhu zernovikh u povitryanomu potoczi [Mathematical model of the movement of the combed grain heap after stripper harvesting module in the air flow]. *Praci Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Proceedings of the Tavria State agrotechnological university*, *Vol.19, 3*, 14-21. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-14-21 [in Ukrainian].
15. Holovlov, V.A., Lezhenkin, O.M., Vershkov, O.O. & Rubtsov, M.O. (2019). Metodyka analitychnogo vyznachennja shvydkosti ruhu chastochky obchisanogo vorohu [Mathematical model of the movement of the combed grain heap after stripper harvesting module in the air flow]. *Praci Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Proceedings of the Tavria State agrotechnological university*, *Vol.19, 3*, 22-28. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-22-28 [in Ukrainian].

Viktor Holovlov, Design Engineer, **Oleksandr Lezenkin,** Prof., DSc.
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, Ukaine

Experimental Research of the Working Process of the Pneumatic Conveyor of the Combed Heap

The article presents the advantages of harvesting grain ears by the method of combing at the root use stripper harvesting module technology with subsequent processing in comparison with combining. Harvesting with this technology is performed by a trailed harvesting machine with stripper working bodies. The implementation of this technology is constrained by namely the lack of scientific substantiation of the operating modes of the pneumatic conveyor of the combed heap. In this regard, there is a problem of researching the pneumatic conveyor, for its solution a method of experimental research was developed, which will determine the optimal parameters and performance of the pneumatic conveyor combed heap.The results of experimental researches of technological process of the pneumotransporter for transportation of the combed heap of grain in the trailer - the cart, namely range of flight of the combed heap depending on frequency of rotation dampers.

The parameters of the factors and the geometric dimensions of the experimental setup were determined by computer simulation in SolidWorks. During the simulation, a full-fledged computer model was developed in real size, where the parameters were obtained by changing the speed of the impeller and changing the geometry of the loading window and the pneumatic line. Using the results of theoretical research, modeling and analysis of literature sources, the limits of the values of the factors were determined, which are given in the table. To conduct experimental research, an experimental setup was made, which allowed to vary the values of variable factors, and thus obtain a variety of data on the range of the combed pile of wheat depending on the values of variable factors.

It is established that it is most expedient to use a noncomposite three - level Box - Benkin plan for three factors, which makes it possible to obtain a mathematical model according to the conducted experiments. The mathematical model is obtained, which in the future will make it possible to establish rational parameters and modes of operation of the compressed heap pneumatic conveyor. Checking the significance of the coefficients. The significance of the regression coefficients indicated that all the coefficients are significant. Checking the adequacy of the model showed that the model is adequate.

stripper harvesting, combed heap, pneumatic conveyor, technique, experiment, research, factors, experimental research

Одержано (Received) 11.11.2021 *Прорецензовано (Reviewed) 17.11.2021*
Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021