



Барановський В.М.
д.т.н., професор

Карп І.В.
аспірант

*Тернопільський
національний технічний
університет ім. Івана
Пулюя*

Baranovsky V.
Doctor of Technical Sciences,
Professor

Karp I.
postgraduate student

*Ternopil Ivan Puluj National
Technical University*

УДК 631.331.85

DOI: 10.37128/2306-8744-2026-1-1

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ВИТРАТ ПОТУЖНОСТІ ШНЕКОВОГО ТРАНСПОРТЕРА

Післязбиральна обробка (просушування, відокремлення домішок, протруювання тощо) зернових матеріалів є одним із важливих аспектів доведення зібраного урожаю до необхідних кондицій і підготовки зерна до його зберігання та подальшого використання в якості посівного матеріалу, хлібопекарського виробництва, кормових сумішей тощо. У цьому контексті, для виконання операції переміщення вологого зернового матеріалу на токах агропідприємств застосовують шнекові транспортери, як одні із самих нескладних за будовою та доволі простих в обслуговуванні транспортних механізмів, що дозволяє підвищити технологічну ефективність всього ланцюга виробництва та використання зернової продукції аграрного сектору. Мета роботи: розробити емпіричні моделі, які описують функціональну зміну продуктивності та витрат потужності процесу транспортування зерна пшениці шнековим транспортером зі змінним кроком спіральних витків гвинтового конвеєра. За результатами проведених планованих факторних експериментів розроблено рівняння регресії зміни продуктивності та витрат потужності шнекового транспортера залежно від зміни площі вихідного отвору бункера, частоти обертання гвинтового конвеєра та вологості зерна пшениці за трьох значень змінного кроку спіральних витків – 5, 8 і 11 см. Встановлено, що апроксимовані значення продуктивності та витрат потужності шнекового транспортера за зміни значень вхідних факторів у межах площі вихідного отвору бункера від 10 до 40 см², частоти обертання гвинтового конвеєра від 120 до 280 об/хв та вологості зерна пшениці від 12% до 18% знаходяться в діапазоні: від 5 до 46 кг/хв та від 77,6 до 180 Вт/хв за кроку витків 5 см; від 10 до 63 кг/хв та 107,8 до 220,6 Вт/хв за кроку витків 8 см; від 20 до 75 кг/хв та від 97,5 до 231,5 Вт/хв за кроку витків 11 см. Розбіжність теоретичних і експериментальних значень продуктивності та витрат потужності становить 10%-15% та 13%-18%. Отримані результати дослідження є одним із напрямків подальшого розвитку методології оптимізації раціональних параметрів процесів роботи гвинтових транспортних механізмів.

Ключові слова: зерно пшениці, гвинтовий конвеєр, процес, параметри, емпірична модель, змінний крок.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ВИТРАТ
ПОТУЖНОСТІ ШНЕКОВОГО
ТРАНСПОРТЕРА © 2026 by Барановський
В.М., Карп І.В. ліцензовано згідно з СС BY 4.0



Вступ. Зважаючи на нестабільні природно-кліматичні умови, які складаються у більшості регіонів України в період стиглості зернових культур і, відповідно, в період механізованого збирання врожаю, просушування зібраного зерна є одним з необхідних фундаментальних етапів його післязбиральної обробки [1, 2].

За умов значного підвищеної вологості повітря, мінливих погодних умов, які призводять до інтенсивних осадів, значна частина зібраної зернової продукції, відсоток якої може становити від 20% до 50% потребує природного або технологічного (механізованого) просушування [3].

У край дощовий період цей показник значно зростає – кількість зібраного вологого зерна вологістю більше 15%–18% зростає до 70%–80% [3, 4].

Раціональна організація сушіння дозволяє підвищити властивості зерна, які запобігають його псуванню в процесі зберігання та значно підвищує його технологічні та продовольчі показники [5].

Продуктивність та витрати потужності шнекового транспортера є одними з основних і пріоритетних показників технологічної ефективності процесів транспортування вологих зернових матеріалів під час післязбирального досушування на площадках зернових токів аграрних підприємств до необхідної кондиції для подальшого їх зберігання в спеціалізованих сховищах [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для виконання операцій доведення зібраного урожаю до необхідних кондицій як подальшого зберігання в сховищах, так і підготовки сировини для переробки зерна в різнопланові продукти на зернотоках невеликих багатопрофільних господарств, як правило застосовують потужні та дорогі транспортні механізми – складні шнекові гвинтові, пневматичні та комбіновані пневмошнекові транспортери з продуктивністю 5...30 т/год, довжиною подачі до 100 метрів і швидкістю руху повітря 15...40 м/с [8, 9].

Проте використання потужних машин для виконання невеликого обсягу таких робіт (в межах 80-100 т) є нераціональним та недоцільним, що призводить до зниження технологічної ефективності виробництва зернової продукції загалом [10].

Дослідження процесів транспортування зернового матеріалу шнековими транспортерами різнопланового конструктивного виконання їх робочих органів описано в багатьох працях, серед них в працях [11-15] тощо, де основні акценти приділено дослідженню технологічних показників процесів переміщення зерна класичними шнековими

механізмами з постійним кроком спіральних витків.

Відомі емпіричні моделі не в достатній мірі характеризують функціональні процеси та наявні особливості транспортування зернових матеріалів гвинтовими конвеєрами зі змінним кроком спіральних витків і зміни діапазону вологості матеріалу. Такі фактори, як змінний крок спіральних витків і вологість зерна пшениці в значній мірі впливають на показники продуктивності та витрати потужності шнекових транспортерів.

Формулювання мети дослідження.

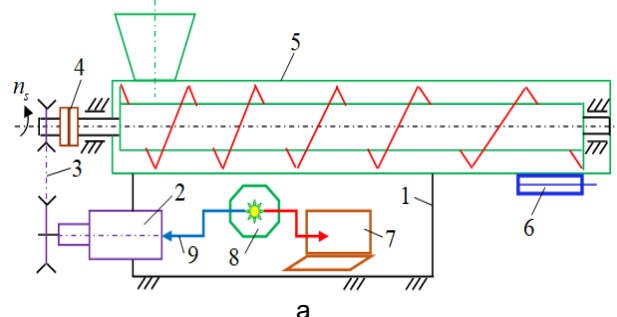
Метою дослідження є удосконалення методології оптимізації раціональних параметрів шнекових транспортних механізмів шляхом розробки емпіричних моделей, які описують функціональну зміну продуктивності та витрати потужності під час транспортування зерна пшениці шнековим транспортером.

Викладення основного матеріалу.

Головним завданням проведення експериментів з визначення продуктивності W_{sc} та витрат потужності P_{sc} макетного зразка шнекового транспортера є встановлення адекватності розроблених відповідних аналітичних математичних моделей, або деякої розбіжності цих показників, які отримано в процесі реалізації теоретичних і експериментальних досліджень процесу транспортування зерна пшениці шнековим транспортером.

У загальному необхідно констатувати, що реалізацію експериментів здійснено на основі застосування загальновідомої методології математичного планування та проведення планованих багатфакторних експериментів, а обробку отриманого експериментального масиву технологічних показників і їх аналізу проведено з застосуванням вбудованих прикладних додатків ліцензованої програми «Microsoft 365» для персонального комп'ютера.

Для встановлення функціональної зміни W_{sc} та P_{sc} залежно від зміни вхідних факторів об'єкта досліджень використано лабораторну установку, схему, загальний вигляд та процес роботи якої наведено на рис. 1.



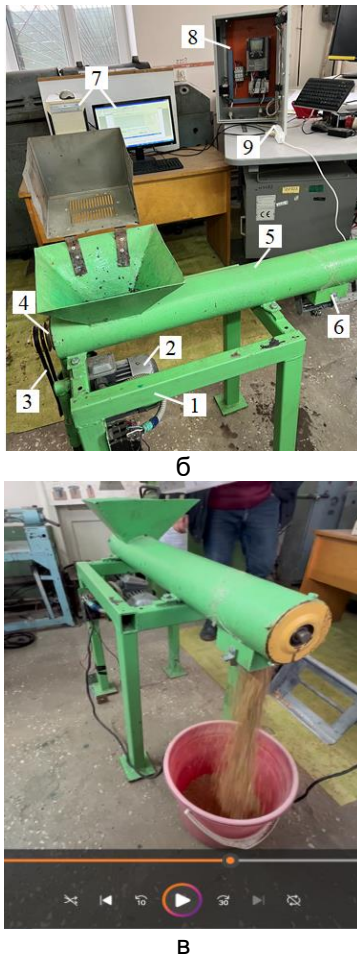


Рис. 1. Схема (а), загальний вигляд (б) та процес роботи (в) лабораторної установки: 1 – рама; 2 – електродвигун; 3 – клинопосова передача; 4 – муфта; 5 – шнековий транспортер; 6 – шибер; 7 – комп'ютер; 8 – керуючий пристрій Altivar 71; 8 – засоби комунікації

В якості емпіричної моделі, яка описує зміну продуктивності W_{isc} (кг/хв) та витрат потужності P_{isc} (Вт) макетного зразка шнекового транспортера прийнято функціональну залежність у вигляді $W_{isc} = f_W(x_1, x_2, x_3)$ та $P_{isc} = f_W(x_1, x_2, x_3)$, тобто функціональну зміну продуктивності W_{sc} (кг/хв) та витрат потужності P_{sc} (Вт) залежно від зміни трьох вхідних факторів (табл. 1) – площі вихідного отвору бункера S_b (см²), частоти обертання гвинтового конвеєра n_s (об/хв), вологості зерна пшениці w_m (%) для трьох значень змінного кроку гвинтового конвеєра $T_{is} = T_1 + \Delta T_i$, де T_1 – початковий постійний крок спіральних витків гвинтового конвеєра, ΔT_i – приріст кроку спіральних витків

гвинтового конвеєра, при цьому $T_1 = const = 5,0$ см, $\Delta T_i = 0; 3,0; 6,0$ (см), або:
 $T_{1s} = T_1 + \Delta T_1 = 5,0 + 0 = 5,0$ (см);
 $T_{2s} = T_1 + \Delta T_2 = 5,0 + 3,0 = 8,0$ (см);
 $T_{3s} = T_1 + \Delta T_3 = 5,0 + 6,0 = 11,0$ (см).

Послідовність порядку реалізації планованих експериментів з визначення W_{sc} та P_{sc} макетного зразка шнекового транспортера встановлювали згідно нумерованого порядку рандомізованої несиметричної план-матриці Бокса-Бенкіна [16], при цьому рандомізацію несиметричної план-матриці Бокса-Бенкіна провели згідно методу випадкового балансу за таблицями випадкових чисел [17], що дозволило скоротити загальну кількість експериментів.

Таблиця 1
Характеристика факторів та рівні їх варіювання

Фактор	Найменування фактора	Варіювання фактором	Рівні фактора
x_1	Площа вихідного отвору бункера S_b , см ²	15	10-25-40
x_2	Частота обертання гвинтового конвеєра n_s , об/хв	80	120-200-280
x_3	Вологість зерна w_m , %	3	12-15-18

Порядок проведення експериментів був таким.

Перед початком реалізації експериментів виконували такі підготовчі операції.

1. Вимірювали вологість w_m зерна пшениці цифровим електронним вологоміром моделі MD7822 та за необхідності доводили вологість зерна до необхідного значення (рис. 2) згідно з встановленим рівнем варіювання фактора шляхом додаткового просушування або водяного зволоження.



Рис. 2. Вимірювання вологості зерна



2. Встановлювали числові значення двох інших вхідних факторів, при цьому:

- завантажували у кореневий каталог жорсткого диска комп'ютера 7 (рис. 1) ліцензоване програмне забезпечення Power Suite версії 2.3.0, призначене для керування мультисистемного керуючого пристрою 9 Altivar 71;

- встановлювали необхідну площу S_b вихідного отвору бункера шнекового транспортера 5 шляхом перестановки всередині бункера пірамідального вкладиша трапецевидної форми;

- задавали необхідну частоту обертання n_s гвинтового конвеєра шнекового транспортера 5 з панелі керування віртуального осцилографа шляхом встановлення відповідної частоти обертання ротора електродвигуна 2 з урахуванням передавального числа клинопасової передачі 3.

3. Завантажували зерновий матеріал встановленої вологості W_m зерна пшениці у бункер шнекового транспортера 5 та командою з панелі керування віртуального осцилографа запускали електродвигун 2 з метою досягнення сталого режиму роботи гвинтового конвеєра за відповідного кроку спіральних витків, або досягнення максимального заповнення робочого простору шнекового транспортера, після чого командою з панелі керування віртуального осцилографа зупиняли електродвигун приводу гвинтового конвеєра.

4. Задавали електронним таймером

мультисистемного пристрою 9 Altivar 71 тривалість, або час $t_e = const = 5$ с проведення експерименту, а після закінчення експерименту, або автоматичної зупинки електродвигуна 2 за рахунок команди з системи управління роботою мультисистемного пристрою Altivar 71 зважували вивантажене в ємність зерно пшениці на електронних вагах PS.200/2000.R1 з точністю $\pm 0,01$ кг, яке надходило через відкриту шибєрну заслінку 6.

5. Визначали «чисті» витрати потужності P_{isc} , які необхідні для реалізації процесу транспортування зернового матеріалу гвинтовим конвеєром шнекового транспортера як різницю між сумарними витратами потужності P_c (Вт) та витратами потужності P_x (Вт) холостого ходу, числові значення яких, відповідно, відображалися (зчитувалися) у вікні віртуального осцилографа.

Графічну інтерпретацію результатів експериментальних дослідження зміни продуктивності W_{isc} та витрат потужності шнекового транспортера для трьох значень змінних кроків спіральних витків гвинтового конвеєра T_{is} представлено у вигляді діаграми, рис. 3, 4.

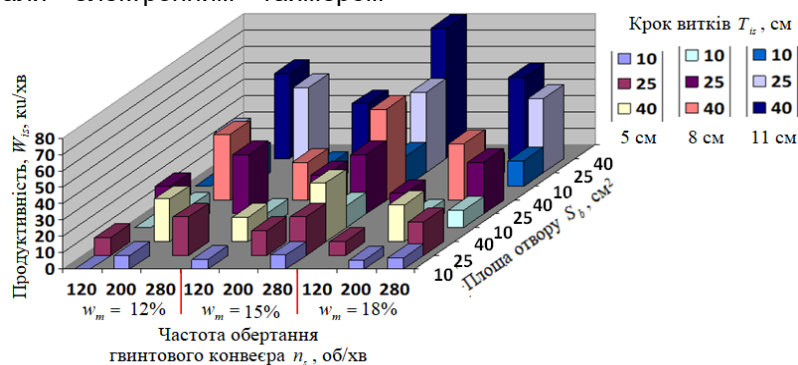


Рис. 3. Діаграма експериментальних значень продуктивності шнекового транспортера

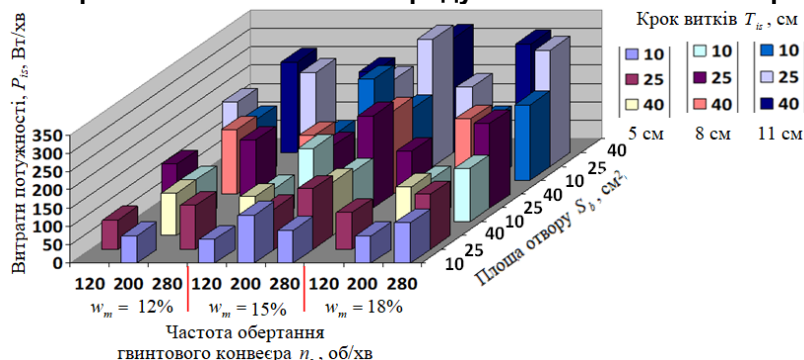


Рис. 4. Діаграма експериментальних значень витрат потужності шнекового транспортера



Апроксимуючу функцію та
 $W_{isc} = f_W(S_b; n_s; w_m)$
 $P_{isc} = f_P(S_b; n_s; w_m)$, які описують
 функціональну зміну продуктивності W_{isc} та
 витрат потужності P_{isc} шнекового
 транспортера залежно від вхідних факторів
 (табл. 1) для трьох значень змінного кроку T_{is}
 спіральних витків гвинтового конвеєра
 визначалася за найбільшим значенням
 коефіцієнта чисельної детермінації, відповідно,
 R_{is}^2 та R_{ic}^2 [18].

Після обробки та аналізу середніх
 значень експериментального масиву даних
 продуктивності W_{isc} та витрат потужності P_{isc}
 шнекового транспортера було виявлено, що

найбільше значення коефіцієнта множинної
 детермінації $R_{1s}^2 = 0,9963$; $R_{2s}^2 = 0,9969$;
 $R_{3s}^2 = 0,9972$ та $R_{1c}^2 = 0,979$; $R_{2c}^2 = 0,977$;
 $R_{3c}^2 = 0,987$ належить цільовій функціональній
 залежності полінома другої степені для рівня
 значущості $\alpha = 0,05$ та значення коефіцієнта
 множинної кореляції $R_{1s} = 0,987$; $R_{2s} = 0,994$;
 $R_{3s} = 0,999$ та $R_{1c} = 0,990$; $R_{2c} = 0,988$;
 $R_{3c} = 0,993$.

Розраховані числові значення
 коефіцієнтів рівняння регресії для відповідних
 факторів та їх взаємодії наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Числові значення коефіцієнтів рівняння регресії

Позначення коефіцієнта	Функція		
	$W_{1sc} = f_W(x_1; x_2; x_3) /$ $P_{1isc} = f_P(S_b; n_s; w_m)$	$W_{2sc} = f_W(x_1; x_2; x_3) /$ $P_{2isc} = f_P(S_b; n_s; w_m)$	$W_{3sc} = f_W(x_1; x_2; x_3) /$ $P_{3isc} = f_P(S_b; n_s; w_m)$
	Значення коефіцієнта		
b_0	2,91 / 137,75	4,88 / 150,28	-0,63 / 259,54
b_1	-0,01 / 2,67	-0,36 / 4,99	-0,12 / 6,28
b_2	-0,04 / -0,11	-0,07 / -0,6 10^{-2}	-0,05 / 0,2
b_3	0,88 / -16,79	1,8 / -21,46	1,93 / -37,68
b_{11}	0,1 10^{-2} / -0,02	0,21 10^{-3} / -0,04	0,2 10^{-2} / 0,05
b_{22}	0,1 10^{-3} / -0,42 10^{-5}	0,13 10^{-3} / -0,1 10^{-3}	0,1 10^{-3} / -0,54 10^{-3}
b_{33}	-0,03 / 0,68	-0,078 / 0,95	-0,07 / 1,47
b_{12}	0,4 10^{-2} / 0,4 10^{-2}	0,63 10^{-2} / 0,54 10^{-2}	0,6 10^{-2} / 0,42 10^{-2}
b_{13}	2,91 / -0,09	0,85 10^{-6} / -0,15	-0,01 / -0,13
b_{23}	-0,6 10^{-3} / 0,02	-0,13 10^{-2} / 0,02	-0,6 10^{-3} / 0,03

Після статистичної перевірки значущості
 коефіцієнтів рівняння регресії, які наведено в
 табл. 2 за t -альфа критерієм Стьюдента [19] та
 адекватності моделі експериментальним
 значенням продуктивності W_{isc} та витрат
 потужності P_{isc} за F -критерієм Фішера [20] було
 встановлено, що:

- критичне значення t -альфа критерію
 Стьюдента $t_{кр}(0,05;5) = 2,571$ для рівня
 значущості $\alpha = 0,05$ та числа ступенів вільності f
 $= n - k = 15 - 10 = 5$; критичне значення F -
 критерію Фішера $F_{кр}(0,05; 9; 5) = 4,77$ для рівня
 значущості $\alpha = 0,05$ та числа ступенів вільності

$f_1 = k - 1 = 10 - 1 = 9$; $f_2 = n - k = 15 - 10 = 5$;

- модель адекватна експериментальним
 даним на рівні значущості $\alpha = 0,05$, відповідно:
 $F_{1сфак} = 148,83 \gg F_{кр} = 4,77$; $F_{2сфак} = 176,74 \gg F_{кр}$
 $= 4,77$; $F_{3сфак} = 200,47 \gg F_{кр} = 4,77$; $F_{1сфакт} = 26,26$
 $\gg F_{кр} = 4,77$; $F_{2сфакт} = 23,26 \gg F_{кр} = 4,77$; $F_{3сфакт} =$
 $41,68 \gg F_{кр} = 4,77$.

Таким чином з врахуванням значущості
 коефіцієнтів рівняння регресії, отримано кінцевий
 вигляд емпіричних моделей у натуральних
 величинах, які функціонально описують зміну
 продуктивності W_{isc} витрат потужності P_{isc}
 шнекового транспортера під час транспортування



зерна пшениці для трьох значень змінного кроку
 T_{1s} спіральних витків гвинтового конвеєра:

- для кроку спіральних витків гвинтового конвеєра $T_{1s} = 5,0$ см:

$$W_{1sc} = 2,91 - 0,01S_b - 0,04n_s + 0,88w_m + 0,1 \cdot 10^{-2} S_b^2 + 0,1 \cdot 10^{-3} n_s^2 - 0,03w_m^2 + 0,4 \cdot 10^{-2} S_b n_s - 0,01S_b w_m - 0,6 \cdot 10^{-3} n_s w_m \quad ; \quad (1)$$

$$P_{1sc} = 137,75 + 2,67S_b - 0,11n_s - 16,79w_m - 0,02S_b^2 - 0,42 \cdot 10^{-5} n_s^2 + 0,68w_m^2 + 0,4 \cdot 10^{-2} S_b n_s - 0,09S_b w_m + 0,02n_s w_m \quad ; \quad (2)$$

- для кроку спіральних витків гвинтового конвеєра $T_{2s} = 8,0$ см:

$$W_{2sc} = 4,88 - 0,36S_b - 0,07n_s + 1,8w_m + 0,21 \cdot 10^{-3} S_b^2 + 0,13 \cdot 10^{-3} n_s^2 - 0,078w_m^2 + 0,63 \cdot 10^{-2} S_b n_s + 0,85 \cdot 10^{-6} S_b w_m - 0,13 \cdot 10^2 n_s w_m \quad ; \quad (3)$$

$$P_{2sc} = 150,28 + 4,99S_b - 0,6 \cdot 10^{-2} n_s - 21,46w_m - 0,06S_b^2 - 0,1 \cdot 10^{-3} n_s^2 + 0,95w_m^2 + 0,54 \cdot 10^{-2} S_b n_s - 0,15S_b w_m + 0,02n_s w_m \quad ; \quad (4)$$

- для кроку спіральних витків гвинтового конвеєра $T_{3s} = 11,0$ см:

$$W_{3sc} = -0,63 - 0,12S_b - 0,05n_s + 1,93w_m + 0,2 \cdot 10^{-2} S_b^2 + 0,1 \cdot 10^{-3} n_s^2 - 0,07w_m^2 + 0,6 \cdot 10^{-2} S_b n_s - 0,01S_b w_m - 0,6 \cdot 10^{-3} n_s w_m \quad ; \quad (5)$$

$$P_{3sc} = 259,54 + 6,28S_b + 0,2n_s - 37,68w_m + 0,05S_b^2 - 0,54 \cdot 10^{-3} n_s^2 + 1,47w_m^2 + 0,42 \cdot 10^{-2} S_b n_s - 0,13S_b w_m + 0,03n_s w_m \quad . \quad (6)$$

Відповідно до емпіричних моделей (1)-(6) побудовано графічні зображення, які характеризують функціональну зміну продуктивності W_{isc} та витрат потужності P_{isc} шнекового транспортера у вигляді 3D моделей, або поверхонь відгуку та 2D моделей як цільова функція, відповідно:

продуктивності W_{isc} та витрат потужності P_{isc}

- $W_{1sc} = f_W(S_b; n_s)$, рис. 5а; $W_{1sc} = f_W(n_s; w_m)$, рис. 5б; $W_{2sc} = f_W(S_b; n_s)$, рис. 6а;
- $W_{2sc} = f_W(n_s; w_m)$, рис. 6б; $W_{3sc} = f_W(S_b; n_s)$, рис. 7а; $W_{3sc} = f_W(n_s; w_m)$, рис. 7б;
- $P_{1sc} = f_P(S_b; n_s)$, рис. 8а; $P_{1sc} = f_P(S_b; w_m)$, рис. 8б; $P_{2sc} = f_P(S_b; n_s)$, рис. 9а;
- $P_{2sc} = f_P(S_b; w_m)$, рис. 9б; $P_{3sc} = f_P(S_b; n_s)$, рис. 10а; $P_{3sc} = f_P(S_b; w_m)$, рис. 10б;

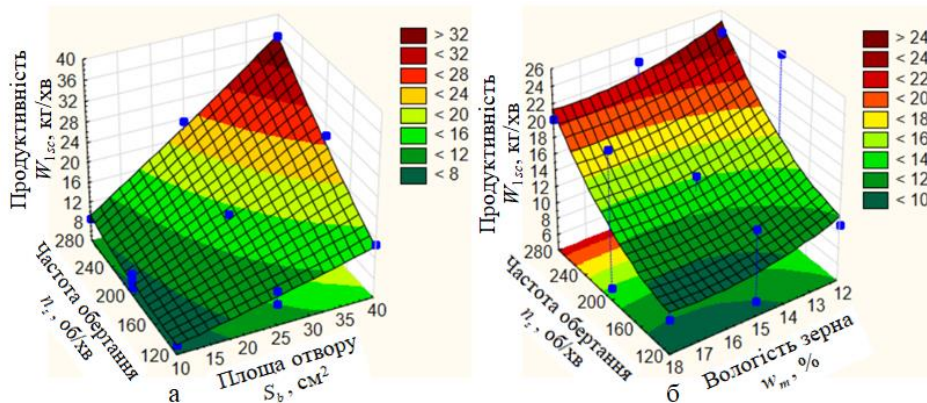


Рис. 5. Поверхня відгуку як функція: а – $W_{1sc} = f_W(S_b; n_s)$; б – $W_{1sc} = f_W(n_s; w_m)$

- $W_{1sc} = f_W(w_m)$, $W_{2sc} = f_W(w_m)$, $W_{3sc} = f_W(w_m)$, рис. 11а; $P_{1sc} = f_P(w_m)$, $P_{2sc} = f_P(w_m)$, $P_{3sc} = f_P(w_m)$, рис. 11б.

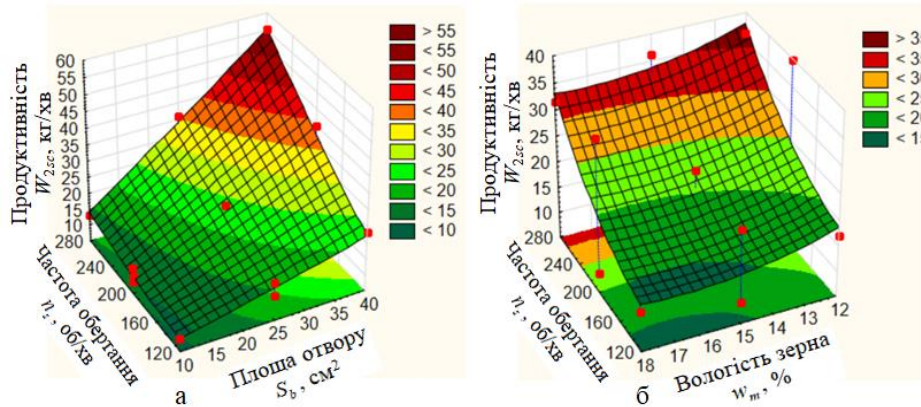


Рис. 6. Поверхня відгуку як функція: а – $W_{2sc} = f_W(S_b; n_s)$; б – $W_{2sc} = f_W(n_s; w_m)$

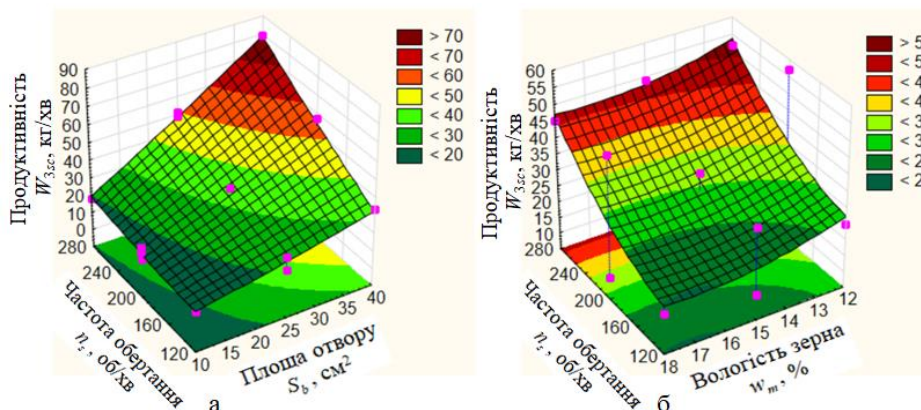


Рис. 7. Поверхня відгуку як функція: а – $W_{3sc} = f_W(S_b; n_s)$; б – $W_{3sc} = f_W(n_s; w_m)$

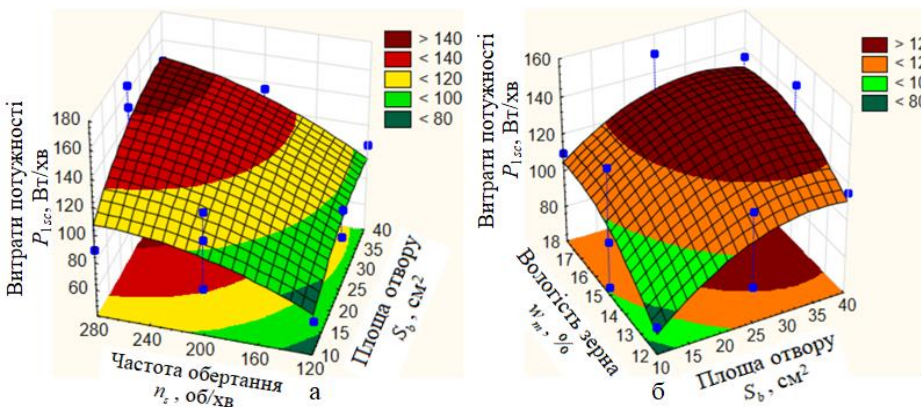


Рис. 8. Поверхня відгуку як функція: а – $P_{1sc} = f_P(S_b; n_s)$; б – $P_{1sc} = f_P(n_s; w_m)$

На основі аналізу емпіричних (1)-(6) та графічних моделей (рис. 5-11) можна констатувати, що апроксимовані значення продуктивності W_{isc} та витрат потужності P_{isc} шнекового транспортера за зміни значень вхідних факторів у межах площі вихідного отвору бункера $10 \leq S_b \leq 40$ см², частоти

обертання гвинтового конвеєра $120 \leq n_s \leq 280$ об/хв та вологості зерна пшениці $12\% \leq w_m \leq 18\%$ знаходяться в діапазоні, відповідно, від 5,0 до 74,6 кг/хв та від 77,6 до 231,5 Вт/хв.

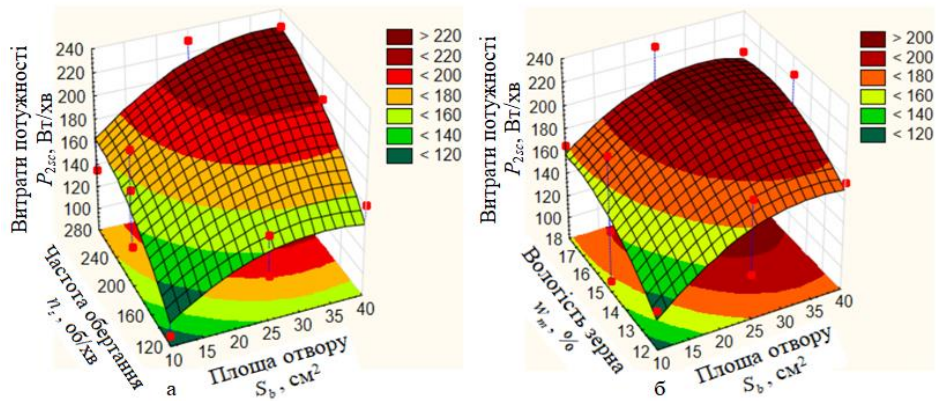


Рис. 9. Поверхня відгуку як функція: а – $P_{2sc} = f_P(S_b; n_s)$; б – $P_{2sc} = f_P(n_s; w_m)$

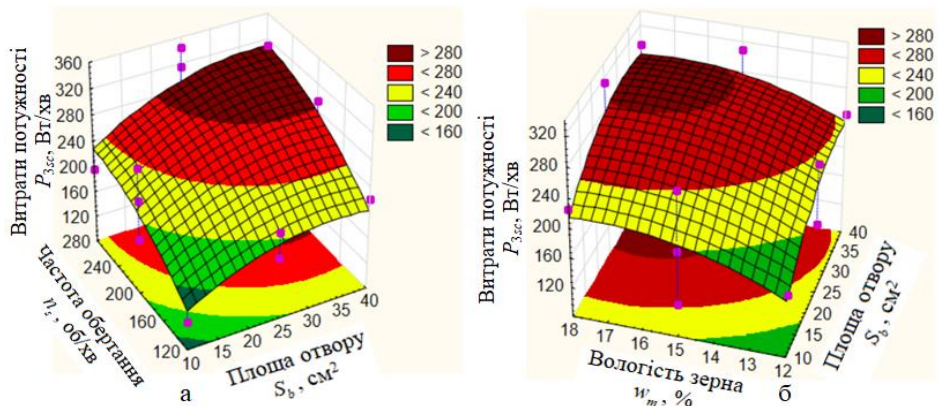


Рис. 10. Поверхня відгуку як функція: а – $P_{3sc} = f_P(S_b; n_s)$; б – $P_{3sc} = f_P(n_s; w_m)$

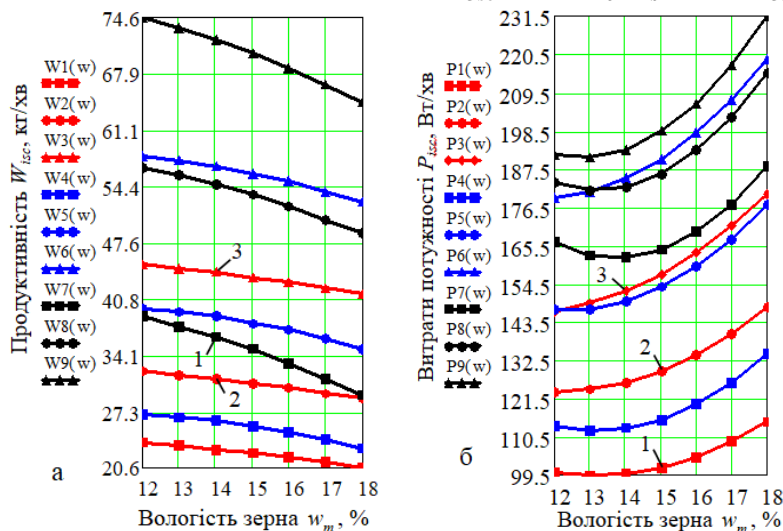


Рис. 11. Залежність зміни W_{isc} та P_{isc} як функція: а – $W_{isc} = f_W(w_m)$; б – $P_{isc} = f_P(w_m)$; $S_b = 40 \text{ см}^2$, 1, 2, 3 – відповідно, $n_s = 120, 200, 280 \text{ об/хв}$; $W1(w), W2(w), W3(w) - T_{1s} = 5,0 \text{ см}$; $W4(w), W5(w), W6(w) - T_{2s} = 8,0 \text{ см}$; $W7(w), W8(w), W9(w) - T_{3s} = 11,0 \text{ см}$

При цьому залежно від значення кроку спіральних витків T_{is} гвинтового конвеєра апроксимовані значення продуктивності W_{isc} та витрат потужності P_{isc} шнекового транспортера

змінюються, відповідно: за $T_{1s} = 5,0 \text{ см}$ – від 5,0 до 46,0 кг/хв та від 77,6 до 180,0 Вт/хв; за $T_{2s} = 8,0 \text{ см}$ – від 10,0 до 63,0 кг/хв та від 107,8 до 220,6 Вт/хв; за $T_{3s} = 11,0 \text{ см}$ – від 20,0 до 75,0 кг/хв та від 97,5 до 231,5 Вт/хв.

Функціональний характер зміни продуктивності W_{isc} та витрат потужності P_{isc} шнекового транспортера залежно від зміни вхідних факторів полягає в наступному:

- в межах збільшення площі S_b вихідного отвору бункера від 10 до 40 см² та швидкості обертання n_s гвинтового конвеєра від 120 до 280 об/хв продуктивність W_{isc} шнекового транспортера збільшується в середньому, відповідно, від 2,5 до 3,5 раза та від 1,3 до 1,7 раза, а витрати потужності P_{isc} – від 1,2 до 1,3 раза та від 1,3 до 1,5 раза, тобто функціональний вплив факторів S_b і n_s на зміну функції відгуку W_{isc} та P_{isc} має прямий характер – збільшення факторів S_b і n_s призводить до зростання W_{isc} та P_{isc} ;

- у загальному трактуванні збільшення вологості w_m зерна пшениці в межах від 12 до 18%, незважаючи на його більшу питому масу одиниці об'єму, призводить до зниження продуктивності W_{isc} шнекового транспортера приблизно від 1,1 до 1,2 рази через його налипання та зниження швидкості руху в поперечному (уздовж поверхні витків спіралі шнека) та поздовжньому (горизонтальному) напрямках, при чому значне зниження W_{isc} відбувається за збільшення вологості w_m зерна пшениці в діапазоні зміни фактора від 16% до 18% – продуктивність W_{isc} зменшується в значних межах, приблизно в 1,3...1,4 раза за рахунок стрімкого зниження сипучості зерна, що сприяє його злипанню та утворенню «пробок», які суттєво збільшують опір між зерном і кожухом;

- у загальному трактуванні збільшення вологості w_m зерна пшениці в межах від 12 до 18% на відміну від продуктивності W_{isc} шнекового транспортера призводить до зростання витрат його потужності P_{isc} приблизно від 0,8 до 1,1 раза за рахунок збільшення питомої маси одиниці об'єму зерна, його налипання на поверхні витків спіралі шнека та утворення комків, при чому значне зростання P_{isc} відбувається за збільшення вологості w_m зерна пшениці в діапазоні зміни фактора від 16% до 18% – витрати потужності P_{isc} зростають в значних межах, приблизно в 1,2...1,3 раза за рахунок стрімкого зниження сипучості зерна, що сприяє його злипанню та

утворенню «пробок», які збільшують опір між зерном і внутрішньою поверхнею кожуха.

Для аналізу впливу зміни кроку T_{is} спіральних витків гвинтового конвеєра на продуктивність W_{isc} та витрати потужності P_{isc} шнекового транспортера побудовано діаграму для факторного простору: нижнього рівня за значення факторів 10 – 120 – 12 (відповідно S_b – n_s – w_m); середнього рівня за значення факторів 25 – 200 – 15, верхнього рівня за значення факторів 40 – 250 – 18, рис. 12.

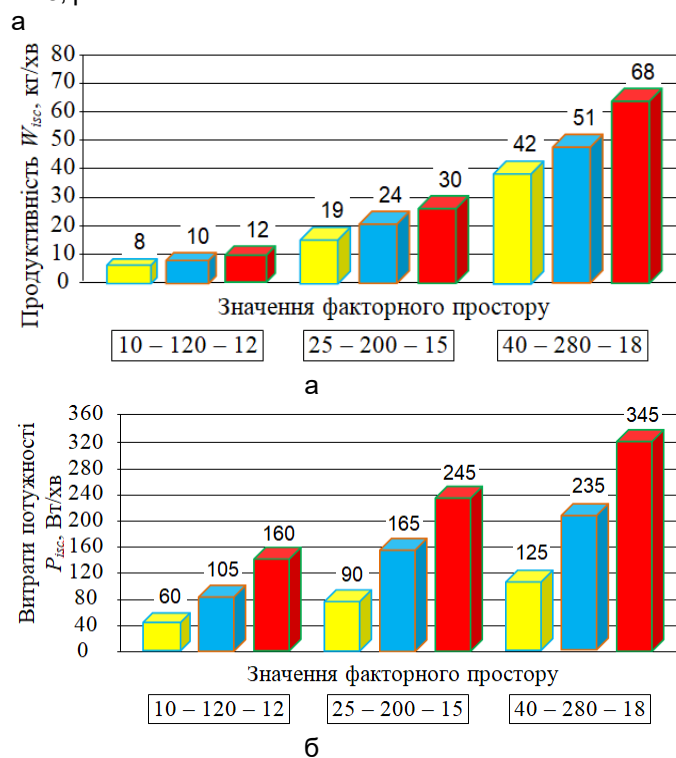


Рис. 12. Діаграма зміни: а – продуктивності W_{isc} шнекового транспортера; б – витрат потужності P_{isc} шнекового транспортера; жовтий колір – $T_{1s} = 5,0$ см; синій колір – $T_{2s} = 8,0$ см; червоний колір – $T_{3s} = 11,0$ см

Встановлено, що зі збільшенням кроку T_{is} спіральних витків гвинтового конвеєра в межах зміни діапазону 5,0; 8,0 та 11,0 см продуктивність W_{isc} шнекового транспортера зростає приблизно в 1,5...1,6 раза, або на 4,0, 11,0 та 24,0 кг/хв, відповідно, а витрати потужності P_{isc} шнекового транспортера зростають приблизно в 1,4...1,5 раза, або на 100,0, 155,0 та 225,0 Вт/хв, відповідно, для нижнього, середнього та верхнього рівня факторного простору за значення факторів 10 –



120 – 12, 25 – 200 – 15, 40 – 250 – 18 (відповідно $S_b - n_s - w_m$).

Висновки. Кореляційний аналіз повністю підтверджує отримані результати рівнянь регресії. Отримані результати кореляційного аналізу узгоджуються з результатами регресійного моделювання та підтверджують коректність обраної математичної моделі у вигляді повного полінома другої степені, відповідно, також підтверджують коректність розроблених математичних моделей, або рівнянь регресії (1)-(6).

Таким чином необхідно констатувати.

1. Найсильніший вплив на зміну продуктивності W_{isc} та витрати потужності P_{isc} шнекового транспортера має взаємодія площі отвору S_b та частоти обертання n_s гвинтового конвеєра ($p < 0,001$). Це критична взаємодія факторів.

2. Окремо площа отвору S_b також є високо-значущим фактором ($p < 0,001$) на зміну продуктивності W_{isc} та витрати потужності P_{isc} шнекового транспортера

3. Частота обертання n_s спіральних витків гвинтового конвеєра має помітний, статистично значущий вплив ($p \approx 0,2022$) на зміну продуктивності W_{isc} та витрати потужності P_{isc} шнекового транспортера.

4. Вологість зерна w_m у межах дослідження істотно не впливає ($p \approx 0,47$) на зміну продуктивності W_{isc} та витрати потужності P_{isc} шнекового транспортера.

5. Квадратичний ефект частоти обертання n_s^2 спіральних витків гвинтового конвеєра є значущим ($p \approx 0,01$) та має вплив на зміну продуктивності W_{isc} та витрати потужності P_{isc} шнекового транспортера, що свідчить про нелінійність впливу обертів гвинтового конвеєра.

6. Отримані результати експериментальних досліджень є одним із напрямків подальшого розвитку методології оптимізації раціональних параметрів процесів роботи гвинтових транспортних механізмів.

Список використаних джерел

1. Адамчук В.В., Булгаков В.М. Агроінженерна наука та підготовка кадрів в Україні на шляху до входження у європейський простір. *Вісник аграрної науки*. 2024. 1(850)/ 6–15. URL: <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202401-01>

2. Hevko R.B., Baranovsky V.M., Lyashuk O.L., Pohrishchuk B.V., Gumeniuk Y.O. The influence of bulk material flow on technical and economical

performance of a screw conveyor. *INMATEH–Agricultural Engineering*. 2018. 56 (3/2018). 175–184. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26717>

3. Lyashuk O., Okipnyi I., Mykulyk P., Hevko R., Lutsiv I., Pastukh O., Vovk Yu. The Dynamics of Impulse Strengthening Process of Screw Crest. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2022. 46(4). 839–850. URL: <https://doi.org/10.1007/s40997-021-00438-0>

4. Manjula E.V.P.J., Hiromi W.K. Ariyaratne, Ratnayake Chandana, Morten C. Melaaen. A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport. *Powder Technology*. 2017. 305. 782–793. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.026>

5. Mills D. Application of stepped pipelines in pneumatic conveying systems. *Proc 15th Int Conf on Hydrotransport*. Banff, Canada. June. 2002. pp. 401–416. URL: <https://www.proceedings.com/00027.html>

6. Yoshihama S., Takano S., Yamada Y., Nakamura T., Kato K. Powder Conveyance Experiments with Peristaltic Conveyor using a Pneumatic Artificial Muscle. *IEEE ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Banff/Canada. 2016. pp.1539–1544. URL: <https://doi.org/10.1109/AIM.2016.7576989>

7. Baranovsky V.M., Hevko R.B., Dzyura V.O., Klendii O.M., Klendii M.B., Romanovsky R.M. Justification of rational parameters of a pneumoconveyor screw feeder. *INMATEH–Agricultural Engineering*. 2018. 54. 1. 15–24. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/25589>

8. Tian Y., Yuan P., Yang F., Gu J., Chen M., Tang J., Su Y., Ding T., Zhang K., Cheng Q. Research on the Principle of a New Flexible Screw Conveyor and Its Power Consumption. *Applied Sciences*. 2018. 8. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/app8071038>

9. Lyashuk O., Sokil B., Hevko R., Aulin V., Serilko L., Vovk Yu., Serilko D., Dovbysh A. The Dynamics of the Working Body of the Tubular Conveyor with the Chain Drive. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 7(3). 2021. 1710–1718. URL: <https://doi.org/10.22055/jacm.2021.35725.2719>

10. Vasylyk V., Pylypets M., Danylchenko L., Radyk D. Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU (Ter.)*. 2021. 104(4). 33–43. URL: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033

11. Baranovsky V., Pankiv M., Komar R., Berezhenko B., Korol O. . Mathematical model of the screw conveyor loading hopper. *Scientific Journal of TNTU (Ter.)*. 2021. 104(4). 109–122. URL: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.109

12. Mills D. The value and use of measurements in pneumatic conveying. Part 1 – conveying air pressure. *Material and Product Handling*. 2002. 2. 7–13. URL:



<http://www.accessintel.com/>

13. Roberts A.W. The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors. *Powder Technology*. 2017. 104. 1. 56–67. URL: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00039-X)

14. Pankiv V.R., Tokarchuk O.A. Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor. *INMATEH–Agricultural engineering*. 2017. 51. 1/2017. 59–68.

15. Pankiv Vitalii. Throughput capability of the combined screw chopper conveyor. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2017. 85. 1. 69–79.

16. Cicco David, Warrens Mathijs J., Jurman Giuseppe. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in the estimation of regression analysis". *PeerJ Informatics*. 2021. 7. (e623). e623. URL: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>

17. Karmoker J.R., Hasan I., Ahmed N., Saifuddin M., Reza M.S. Development and Optimization of Acyclovir Loaded Mucoadhesive Microspheres by Box -Behnken Design. *Dhaka University Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2019 18(1). 1–12. URL: <https://doi.org/10.3329/dujps.v18i1.41421>

18. Rosenbluth M.N. Genesis of the Monte Carlo Algorithm for Statistical Mechanics. *AIP Conference Proceedings*. 2003. 690. 22–30. DOI:10.1063/1.1632112

19. Mishra P., Singh U., Pandey C.M., Priyadarshni M., Pandey G. Application of Student's t-test, analysis of variance, and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia*. 2019. 22(4). 407–411.

20. Sureiman O., Mangera C.M. F-Test of Overall Significance in Regression Analysis-Simplified. *Journal of the Practice of Cardiovascular Sciences*. 2020. 6(2). 116–122.

References

1. Adamchuk V.V., Bulgakov V.M. (2024). Agroengineering science and personnel training in Ukraine on the way to entering the European space. *Bulletin of Agricultural Science*. 1(850)/ 6–15. doi: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202401-01>

2. Hevko R.B., Baranovsky V.M., Lyashuk O.L., Pohrishchuk B.V., Gumeniuk Y.O. (2018). The influence of bulk material flow on technical and economical performance of a screw conveyor. *INMATEH–Agricultural Engineering*. 56 (3/2018). 175–184. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26717>

3. Lyashuk O., Okipnyi I., Mykulyk P., Hevko R., Lutsiv I., Pastukh O., Vovk Yu. (2022). The Dynamics of Impulse Strengthening Process of Screw Crest. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 46(4). 839–850. doi: [10.1007/s40997-021-00438-0](https://doi.org/10.1007/s40997-021-00438-0)

4. Manjula E.V.P.J., Hiromi W.K. Ariyaratne, Ratnayake Chandana, Morten C. Melaen. (2017). A

review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport. *Powder Technology*. 305. 782–793. doi: [10.1016/j.powtec.2016.10.026](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.026)

5. Mills D. (2002). Application of stepped pipelines in pneumatic conveying systems. *Proc 15th Int Conf on Hydrotransport*. (pp. 401–416). Banff, Canada. June 2002. <https://www.proceedings.com/00027.html>

6. Yoshihama S., Takano S., Yamada Y., Nakamura T., Kato K., (2016). Powder Conveyance Experiments with Peristaltic Conveyor using a Pneumatic Artificial Muscle. *IEEE ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 1539–1544. Banff/Canada. doi: [10.1109/AIM.2016.7576989](https://doi.org/10.1109/AIM.2016.7576989)

7. Baranovsky V.M., Hevko R.B., Dzyura V.O., Klendii O.M., Klendii M.B., Romanovsky R.M. (2018). Justification of rational parameters of a pneumoconveyor screw feeder. *INMATEH–Agricultural Engineering*. 54. 1. 15–24. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/25589>

8. Tian Y., Yuan P., Yang F., Gu J., Chen M., Tang J., Su Y., Ding T., Zhang K., Cheng Q. (2018). Research on the Principle of a New Flexible Screw Conveyor and Its Power Consumption. *Applied Sciences*. 8. 7. doi: [10.3390/app8071038](https://doi.org/10.3390/app8071038)

9. Lyashuk O., Sokil B., Hevko R., Aulin V., Serilko L., Vovk Yu., Serilko D., Dovbysh A. (2021). The Dynamics of the Working Body of the Tubular Conveyor with the Chain Drive. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 7(3). 1710–1718. doi: [10.22055/JACM.2021.35725.2719](https://doi.org/10.22055/JACM.2021.35725.2719)

10. Vasylyk V., Pylypets M., Danylchenko L., Radyk D. (2021) Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 104(4). 33–43. doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033

11. Baranovsky V., Pankiv M., Komar R., Berezhenko B., Korol O. (2021). Mathematical model of the screw conveyor loading hopper. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 104(4). 109–122. doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.109.

12. Mills D. (2002). The value and use of measurements in pneumatic conveying. Part 1 – conveying air pressure. *Material and Product Handling*. 2. 7–13. <http://www.accessintel.com/>

13. Roberts A.W. (2017). The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors. *Powder Technology*. 104. 1. 56–67. doi: [10.1016/S0032-5910\(99\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00039-X)

14. Pankiv V.R., Tokarchuk O.A. (2017). Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor. *INMATEH–Agricultural engineering*. 51. 1/2017. 59–68.

15. Pankiv Vitalii. (2017). Throughput capability of the combined screw chopper conveyor. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 85. 1. 69–79.



16. Cicco David, Warrens Mathijs J., Jurman Giuseppe. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in the estimation of regression analysis". *PeerJ Informatics*. 7. (e623). e623. doi: [10.7717/peerj-cs.623](https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623)

17. Karmoker J.R., Hasan I., Ahmed N., Saifuddin M., Reza M.S. (2019). Development and Optimization of Acyclovir Loaded Mucoadhesive Microspheres by Box -Behnken Design. *Dhaka University Journal of Pharmaceutical Sciences*. 18(1). 1–12. doi: [10.3329/dujps.v18i1.41421](https://doi.org/10.3329/dujps.v18i1.41421)

18. Rosenbluth M.N. (2003). Genesis of the Monte Carlo Algorithm for Statistical Mechanics. *AIP Conference Proceedings*. 690. 22–30. doi: [10.1063/1.1632112](https://doi.org/10.1063/1.1632112)

19. Mishra P., Singh U., Pandey C.M., Priyadarshni M., Pandey G. (2019). Application of Student's t-test, analysis of variance, and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia*. 22(4). 407–411.

20. Sureiman O., Mangera C.M. (2020): F-Test of Overall Significance in Regression Analysis-Simplified. *Journal of the Practice of Cardiovascular Sciences*. 6(2). 116–122.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CONVEYING CAPACITY AND POWER CONSUMPTION OF A SCREW CONVEYOR

Post-harvest processing of grain materials (drying, impurity separation, seed treatment, etc.) is a critical stage in ensuring the required quality standards and preparing grain for storage and subsequent use as seed material, for baking production, or for feed mixtures. In this context, screw conveyors are widely used at agricultural grain-handling facilities for

transporting moist grain, as they represent structurally simple and relatively low-maintenance conveying mechanisms that enhance the overall technological efficiency of grain production and utilisation chains in the agricultural sector. The aim of this study was to develop empirical models describing the functional variation of conveying capacity and power consumption during the transportation of wheat grain by a screw conveyor with variable pitch of the helical flights. Based on planned factorial experiments, regression equations were obtained to describe changes in conveying capacity and power consumption as functions of the hopper outlet area, screw rotational speed, and wheat grain moisture content at three values of the variable flight pitch (5, 8, and 11 cm). It was established that, within the investigated ranges of input factors – hopper outlet area from 10 to 40 cm², screw rotational speed from 120 to 280 rpm, and wheat grain moisture content from 12% to 18% – the approximated values of conveying capacity and power consumption vary as follows: Pitch 5 cm: 5–46 kg·min⁻¹ and 77.6–180 W; Pitch 8 cm: 10–63 kg·min⁻¹ and 107.8–220.6 W; Pitch 11 cm: 20–75 kg·min⁻¹ and 97.5–231.5 W. The discrepancy between theoretical and experimental values ranged from 10–15% for conveying capacity and 13–18% for power consumption. The obtained results contribute to the further development of methodologies for optimising rational parameters of screw conveying processes

Keywords: wheat grain, screw conveyor, conveying process, operating parameters, empirical model, variable pitch, conveying capacity, power consumption, factorial experiment, regression equation.

Відомості про авторів

Барановський Віктор Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інжинірингу машинобудівних технологій факультету інженерії машин, споруд та технологій Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя. <https://orcid.org/0000-0002-7332-1783>

Карп Іван Володимирович – аспірант кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя e-mail: ivankarpv@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-6137-3911>

Baranovsky Viktor – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering of Machine Building Technologies, Faculty of Engineering of Machines, Structures and Technologies of Ternopil Ivan Pulyu National Technical University. <https://orcid.org/0000-0002-7332-1783>

Karp Ivan – postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technologies of Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University e-mail: ivankarpv@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0002-6137-3911>

Стаття надійшла 28.01.2026

Стаття прийнята 11.02.2026

Опубліковано 17.04.2026