

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ТЕХНІКА ТА ОБЛАДНАННЯ: ПРОГНОЗУВАННЯ, КОНСТРУЮВАННЯ, ВИПРОБУВАННЯ

УДК 631.354.2.026.001.5

[https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2024-2-35\(49\)-1](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2024-2-35(49)-1)

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКА «ДРОБЛЕННЯ ЗЕРНА» ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА

Халін С., канд. екон. наук,
<https://orcid.org/0000-0002-7510-5056>,
Занько М., канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,
<https://orcid.org/0000-0001-8964-0706>,
Гайдай Т., канд. техн. наук,
<https://orcid.org/0000-0001-9141-4820>,
Степченко С., <https://orcid.org/0000-0003-2808-9644>,
Лень О., <https://orcid.org/0000-0003-0454-119X>,
ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»; смт Дослідницьке

Анотація

Мета роботи – дослідити технологічний процес барабанної молотильно-сепарувальної системи (МСС) зернозбирального комбайна з барабанною молотаркою класичного типу та визначити показники дроблення зерна за результатами багатофакторного математичного та графічного моделювання з урахуванням впливу на процес пошкодження зерна всіх факторів, властивих для МСС цього типу.

Методи та матеріали. У ході проведення експериментальних досліджень, графічного та математичного моделювання застосовані методи аналізу і синтезу. Метод синтезу дає змогу досліджувати показник дроблення зерна при умові конструкційної єдності систем молотарки. Метод аналізу зумовлює дослідження функціональні системи незалежно від інших систем. Методи математичного та графічного моделювання використано у процесі розробки математичної та графічної моделей показника втрат зерна.

Результати. Побудовано графічну схему формування показника дроблення зерна. До неї включені технологічні режими функціонування, технічні параметри МСС та агрофізичні характеристики зерна і соломи. За результатами експериментальних багатофакторних досліджень створено багатофакторну математичну модель і графічну залежність показника дроблення зерна.

Аналіз графічної залежності засвідчив, що найменша кількість зерна пошкоджується при високих подачах хлібної маси до МСС. Найменше зерно пошкоджується у процесі роботи молотильного барабана з частотою обертання на рівні 800 хв⁻¹. Пошкодження зерна до 2,0% забезпечує МСС з частотою обертання молотильного барабана 860-920 хв⁻¹.

Висновки. Математична модель показника дроблення зерна з достатньою достовірністю характеризує якість зерна після його обмолоту в МСС молотарки класичного типу. Основними факторами, які найбільшою мірою зумовлюють дроблення зерна, є частота обертання молотильного барабана і величина подачі хлібної маси на обмолот. Графічна модель показника дроблення зерна дає змогу визначити оптимальний режим роботи МСС з метою отримання зерна з допустимою кількістю дробленого.

Ключові слова: зернозбиральний комбайн, молотильно-сепарувальна система, частота обертання молотильного барабана, подача хлібної маси на обмолот; математична модель, графічне моделювання.

Вступ. Функціональна оцінка технологічного процесу зернозбирального комбайна передбачає визначення кількості механічно подрібненого зерна різного рівня дроблення ступенем у складі отриманого при обмолоті. Максимально допустима величина цього показника при обмолоті зернових колосових культур встановлена на рівні 2,0%. Однак дослідження свідчать, що у виробничих умовах пошкодження зерна в комбайні значно перевищує встановлену величину [Халін та ін., 2023].

Дослідження підтверджують, що зерно переважно пошкоджується (зазнає дроблення) в молотарці при його відділенні — вимолоті з колосу [Халін та ін., 2023]. Цей процес є наслідком впливу на зерно робочих органів молотильно-сепарувальної системи (МСС) — так званих бил і деки. При цьому рівень їхнього впливу на зерно залежить від кількості зерна та соломи у складі хлібної маси: чим більше соломи та зерна в МСС, тим меншим є негативний вплив МСС на зерно та його механічне пошкодження. Інтенсивність їхнього впливу на хлібну масу також визначається частотою обертання молотильного барабана [Занько, Осипов, 1997; Занько, Осипов, 1998]. Зазначені фактори найбільшою мірою змінюються в умовах експлуатації комбайна. Однак ні інструкції з експлуатації комбайна, ані дослідницькі роботи здебільшого не мають належного підтвердження та не відображають вплив на досліджуваний показник у вигляді конкретної залежності. Унаслідок цього процес обмолоту хлібної маси в МСС та отримання зерна встановленої якості (за вмістом у ньому подрібненого) фактично некеровані та непрогнозовані [Пугачев, 1976; Осипов, Занько, 1997]. Водночас проблема отримання якісного зерна на завершальному етапі його виробництва є першорядним завданням [Шалагинов, 1981]. Управління якістю зерна є достатньо реальним завданням. Для цього необхідно врахувати всі фактори впливу на процес обмолоту зерна. Важлива роль у цьому процесі належить технологічним налаштуванням із урахуванням основних

факторів впливу на цей процес [Кленин, Егоров, 1971]. Така багатофакторна оцінка якісних показників роботи можлива як на рівні макросистеми «зернозбиральний комбайн», так і на рівні складових його систем, зокрема на рівні молотильної системи [Занько, 2012].

Досліджено вплив величини подачі хлібної маси в молотильну систему, частоти обертання молотильного барабана та зазору між барабаном і підбарабанням на пошкодження зерна. При збільшенні подачі зерна в молотильну систему пошкодження зерна зменшується. Найбільший вплив на пошкодження зерна має частота обертання молотильного барабана. У ході збирання сухих культур або зернових культур на насіння (з вологістю 12-14% і подачі в молотильний апарат допустимого граничного потоку врожаю раціональна швидкість барабанних молотильних барабанів становить 25 м/с; при збиранні вологої культури (вологість > 18%) раціональна швидкість барабанних молотильних барабанів становить від 31 м/с до 34 м/с. Установлено, що вимолот зерна і його пошкодження за всією довжиною підбарабання збільшуються при зменшенні зазору між барабанними билами і молотильно-сепарувальною декою [Shpokas et al., 2008].

Для вирішення проблеми зміни продуктивності обмолоту зернозбирального комбайна досліджено молотильний барабан змінного діаметра з рухомими радіальними пластинами за принципом концентричного регулювання. В основному він складається з механізму для регулювання діаметра шляхом переміщення радіальних пластин, шести фіксованих молотильних стрижнів, шести висувних молотильних стрижнів і одного порожнистого гідравлічного циліндра. Зазор обмолоту регулюється шляхом безступінчатої зміни діаметра барабана. За допомогою моделювання в польових умовах при дослідженні продуктивності регульовані діапазони діаметра та зазору рухомого молотильного барабана зі змінним діаметром становили 670-710 мм і 10-30 мм. Виходя-

чи з величини подачі хлібної маси в комбайн, частоти обертання молотильного барабана та молотильного зазору як факторів впливу а також коефіцієнта втрат зерна від захоплення, швидкості обмолоту зерна та величини дроблення зерна як параметрів індексів оцінки проведені трифакторні дослідження, а дані результатів проаналізовані за допомогою спеціальної програми. Визначено оптимальний молотильний зазор і швидкість обертання молотильного барабана при різних обсягах живлення [Wang et al., 2010].

Математичне моделювання ефективно використано в описі технологічного процесу системи очищення зернозбирального комбайна. Експериментальні вимірювання швидкості повітряного потоку на поверхні решітного стану становили 3,75-10,2 м/с, що співпадає з результатами математичного моделювання системи очищення зернозбирального комбайна методами механіки [Badretdinov et al., 2019].

Ряд технічних параметрів систем зернозбирального комбайна є постійними, тому зміна втрат при зміні кожного вищезазначеного аргумента прослідковується. Для мінімізації втрат можна змінювати кожен параметр окремо або одночасно. Змінюючи вхідні параметри можна було визначити оптимальні режими обмолоту для зміни втрат залежно від окружної швидкості ротора, інтенсивності (продуктивності) потоку живлення, зазорів між ротором, кожухом ротора і швидкості подачі [Vladut et al., 2023].

Функціями вираження функціональних і конструкційних параметрів молотильної системи були математичні моделі з коефіцієнтами. Моделі побудовані за допомогою великої бази даних, отриманих у ході експериментальних випробувань значної кількості аксіально-роторних і тангенціальних молотильних систем. Перевірка прогнозованих і експериментальних даних свідчить, що всі рівняння є достовірними [Miu, Kutzbach, 2008].

Аналіз динаміки процесу обмолоту молотильного механізму зернозбирального комбайна проведено із застосуванням

методів моделювання. Сила взаємодії та контакту молотильного біла із зерном порівнювалася з даними проаналізованої літератури для перевірки точності й ефективності запропонованого алгоритму. Цей підхід реалізований як явне формулювання, придатне для покращення обчислювальної ефективності глобальної динаміки для систем обмолоту шляхом удару. Порівняльний аналіз моделювання проводився з використанням програмного забезпечення для роторної молотильної системи аксіального типу та молотильної системи на базі бильного барабана тангенціального типу [Qian et al., 2023].

Швидкість подрібнення зерна є одним із ключових показників оцінки якості роботи зернозбирального комбайна. У ході збору врожаю на рівень подрібнення зерна впливають такі фактори, як стан культури, умови та режими роботи. З метою встановлення факторів впливу та мінімізації кількості дробленого зерна створено математичну модель дроблення зерна на базі чотирифакторних польових експериментів. Результати польового експерименту засвідчили, що вологість зерна визначає швидкість обертання молотильного барабана при обмолоті хлібної маси, продуктивність обмолоту в молотильній системі та зазор між підбарабанням і молотильним барабаном. Шляхом моделювання отримано оптимальні режими в умовах польового експерименту: робочу швидкість, частоту обертання молотильного циліндра, зазор на виході обмолоченої маси з молотильної системи [Sun et al., 2020].

З метою аналізу дроблення сільськогосподарських матеріалів використано метод дискретних елементів. Однак дослідження параметрів агломератного режиму відносно обмежені, тому необхідно дослідити вплив параметрів моделі агломерації на макроскопічну механічну реакцію дроблення. Моделі агломератів зерен кукурудзи побудовані на основі моделі зв'язаних частинок, а поведінка агломерату при роздавлюванні була змодельована за допомогою тесту на стиснення. Результати

свідчать, що спосіб наповнення частинками, розмір частинок і контактний радіус зв'язування частинок значно впливають на структуру сил усередині агрегату, що позначається на його механічних властивостях [Long et al., 2022].

Досліджено рух рослинного матеріалу через молотильний простір осевого молотильного агрегату. Розроблені кінематичні рівняння базуються на нелінійному законі, що визначає нерівномірний рух матеріалу нерівною гвинтовою траєкторією між ротором і увігнутою кліткою. Ці рівняння описують характеристики траєкторії матеріалу (довжина, кут, довжина кроку та кількість обертів матеріалу) як функції поздовжнього положення вздовж ротора та компоненти швидкості руху матеріалу. Кінематична модель виявилася дуже важливою та корисною для прогнозів [Miu, Kutzbach, 2007].

Дроблення зерна кукурудзи в молотарці досліджувалося за планом багатфакторного експерименту при трьох робочих швидкостях, які обумовлювали три рівні подачі хлібної маси на обмолот і двох рівнях частоти обертання молотильного барабана. Результати дають змогу проаналізувати й сформулювати висновки про вплив величини подачі та інтенсивності обмолоту на рівень подрібнення та чистоту зерна [Aljibouri et al., 2022].

Виконано дослідження та визначено оптимальні режими обмолоту для мінімізації втрат зерна за комбайном залежно від впливових параметрів систем обмолоту та сепарації. Встановлено, що втрати зерна за комбайном залежать від частоти обертання молотильного ротора і периферійної швидкості ротора, інтенсивності подачі хлібної маси на обмолот, технологічного зазору між ротором молотильно-сепарувальною декою, щільності технологічного матеріалу, довжини молотильного апарату. Прослідковувалася зміна втрат за кожним зазначеним аргументом [Vladut et al., 2023].

Моделювання процесу обмолоту та сепарації передбачає застосування методу опису, аналізу та аналітичного визначен-

ня продуктивності системи: молотильний апарат — робочий процес. Моделювання процесу сепарації насіння, що проходить через осевий молотильний пристрій, виконано з урахуванням того, що функція сепарації $ss(x)$ задана залежно від довжини молотильного апарату. Потім були створені моделі для опису варіації відсотка (кумулятивного) відокремленого насіння $ss(x=L)$, що відповідає модифікації функціональних параметрів молотильного апарату залежно від окружної швидкості ротора, потоку частин соломи і вологості частин соломи [Cujbescu et al., 2021].

Постановка завдань. Для дослідження технологічного процесу барабанної МСС зернозбирального комбайна — дроблення зерна методами багатфакторного математичного та графічного моделювання необхідно:

- проаналізувати дослідження показника «дроблення зерна» молотарці з урахуванням факторів впливу на його формування;
- розробити графічну схему формування показника дроблення зерна оптимальної складності;
- розробити залежність показника «дроблення зерна» оптимальної складності;
- скласти план експериментальних досліджень показника «дроблення зерна» оптимальної складності;
- реалізувати у польових умовах на базі зернозбирального комбайна з барабанною МСС класичного типу багатфакторні експериментальні дослідження показника «дроблення зерна» при різних режимах подачі й інтенсивності обмолоту хлібної маси;
- побудувати (з використанням прикладної програми) математичну та графічну моделі показника дроблення зерна;
- проаналізувати рівень пошкодження зерна в комбайні із застосуванням графічної моделі;
- сформулювати висновки за результатами проведених досліджень.

Методи і матеріали. У ході проведення експериментальних досліджень, а на їхній базі — графічного та математичного

моделювання застосовано методи аналізу і синтезу. Метод синтезу дає змогу експериментально досліджувати показник дроблення зерна при умові конструкційної єдності і взаємоз'язку технічних і технологічних систем молотарки та режимів їхньої роботи. Метод аналізу дав змогу виділити в складі молотарки її складові функціональні системи, зокрема молотильно-сепарувальну систему і досліджувати її з урахуванням технічних параметрів, технологічних режимів та умов роботи незалежно від інших систем. Методи математичного моделювання використано при побудові математичної моделі показника втрат зерна. Графічне багатofакторне моделювання уможливило побудову графічної моделі і проведення дослідження дроблення зерна залежно від факторів різних груп.

Результати досліджень. За результатами аналітичних досліджень побудовано графічну схему формування показника дроблення зерна (рис. 1). До неї включено як перемінні фактори технологічні режими функціонування МСС — зазори в МСС і частота обертання молотильного барабана та величина подачі хлібної маси молотарку. Незмінними факторами прийнято технічні параметри МСС (діаметр молотильного барабана) і оптимальні агрофізичні характеристики хлібної маси (вологість зерна і соломи).

Зерно зазнає макропошкоджень (дроблення) на всіх технологічних ділянках руху в комбайні, однак основний рівень пошкодження обумовлений молотильно-сепарувальною системою. Згідно з результатами досліджень і відповідно до функціональної схеми (рис. 1) показник дроблення зерна D можна представити через більш конкретну залежність загального вигляду:

$$D = f(X_i; Z_i; U_i), \quad (1)$$

де X_i ($i = 1, n$) — технічні параметри МСС, Z_i ($i = 1, m$) — агрофізичні характе-

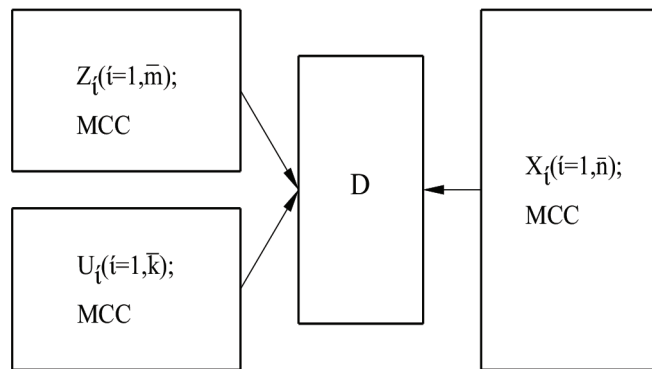


Рисунок 1 – Функціональна схема формування показника «дроблення зерна» на рівні молотильно-сепарувальної системи, де: D – дроблення зерна, %;

X_i ($i = 1, n$) – технічні параметри МСС;

Z_i ($i = 1, m$) – агрофізичні характеристики хлібної маси;

U_i ($i = 1, k$) – технологічні режими функціонування МСС

ристики хлібної маси, U_i ($i = 1, k$) – технологічні режими функціонування МСС.

Відповідно до мети досліджень залежність (1) конкретизована на рівні факторів впливу у такому вигляді:

$$D = f(Q; D_o; n; D_l), \quad (2)$$

де: Q — подача технологічної маси молотарку, кг/с; D_o — технологічний зазор на вході хлібної маси в МСС, мм; n — частота обертання молотильного барабана, хв⁻¹; D_l — технологічний зазор на виході маси з МСС, мм.

Експериментальні (у польових умовах) багатofакторні дослідження пошкодження зерна реалізовані залежно від інтенсивності обмолоту в класичній МСС барабанного типу та технологічного режиму — подачі технологічної маси озимої пшениці на обмолот. Проведено 87 експериментів. Оптимальна частота обертання молотильного барабана діаметром 600 мм різних комбайнів знаходилася в діапазоні 850-100 об/хв, подача хлібної маси в МСС становила 2,9-8,4 кг/с, зазори на вході в МСС — 7-9 мм, зазори на виході маси з МСС — 17-22 мм. При цих технологічних режимах пошкодження зерна отримано в межах 0,59-5,40% (табл. 1).

На базі отриманих експериментальних даних і з використанням розробленої прикладної математичної програми «СОМ» («Синтез оптимальних моделей»)

Таблиця 1 – План багатofакторного експерименту та результати досліджень пошкодження зерна в МСС (фрагмент)

№ досліджу	Технологічні режими роботи МСС				Якість зерна
	Q, кг/с	n, об/хв.	D0, мм	D1, мм	D, %
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y
1	2,90	850	17	9	4,30
2	4,90	850	17	9	3,29
3	6,20	850	17	9	2,81
4	6,60	850	17	9	2,60
5	7,20	850	17	9	2,40
6	7,50	850	17	9	2,10
7	9,10	850	17	9	1,90
8	3,60	860	17	7	3,20
9	4,80	860	17	7	2,65
10	5,20	860	17	7	2,33
11	6,50	860	17	7	2,18
12	7,50	860	17	7	1,96
13	8,40	860	17	7	1,72
25	1,70	1000	22	6	5,40
26	3,60	1000	22	6	4,60
27	4,80	1000	22	6	4,00
28	5,50	1000	22	6	3,50
29	5,80	1000	22	6	3,20
30	5,90	1000	22	6	3,10
31	6,50	1000	22	6	2,90
32	4,00	800	19	9	2,30
83	6,48	1000	18	7	0,79
84	6,73	1000	18	7	0,82
85	6,76	1000	18	7	0,78
86	7,05	1000	18	7	0,72
87	7,93	1000	18	7	0,59

побудовано багатofакторну математичну модель (3). У її складі є фактори-показники Q , D_0 , n та D_1 з різними коефіцієнтами:

$$D = 267,8199/(Q \cdot D_0) - 49,29 \cdot 106/n^2 + 82,56 \cdot 104/(n \cdot D_0) - 8,9767/D_1 + 38828,8008/n + 0,03142 \cdot n - 42,432/(Q \cdot D_1) - 1,1896 \cdot n/D_0, \quad (3)$$

На підставі моделі (3) та із застосуванням прикладної програми побудовано графічну залежність показника дроблення зерна – $D = f(Q; n)$ (рис. 2).

Аналіз графічної залежності (рис. 2) свідчить таке:

- найбільшою мірою зерно пошкоджується у ході роботи МСС в режимі малих

подач, властивих комбайну в «стартовий» період його роботи. У цей час в МСС знаходиться мало хлібної маси, що обумовлює значний нищівний вплив бил молотильного барабана і дек МСС на зерно;

- найменше зерно пошкоджується при високих подачах хлібної маси до МСС, що властиво роботі комбайна в режимі його номінальної (паспортної) продуктивності (пропускної здатності);

- найменше зерно пошкоджується / дробиться у процесі роботи молотильного барабана з частотою обертання на рівні 800 хв⁻¹. Однак такий режим обмолоту барабаном із діаметром 600 мм для цього типу

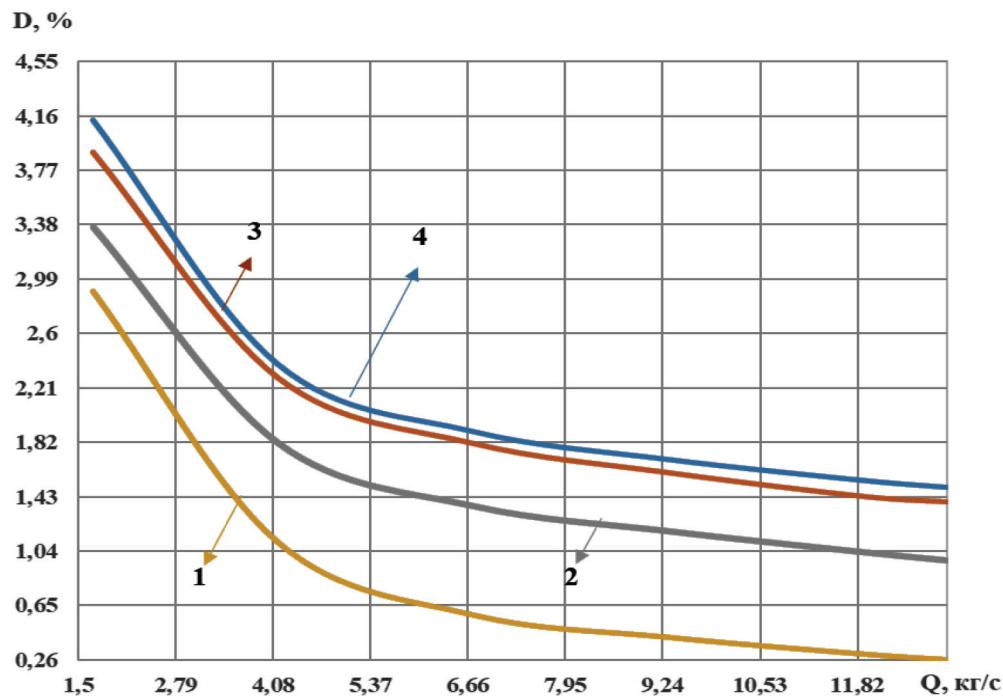


Рисунок 2 – Залежність кількості дробленого зерна від подачі технологічної маси озимої пшениці на обмолот до МСС та частоти обертання молотильного барабана (при $W_3 = 16\%$, $D_0 = 18$ мм, $D_1 = 8$ мм) – $D = f(Q; n)$, де 1 – $n = 800$ хв⁻¹; 2 – $n = 830$ хв⁻¹; 3 – $n = 890$ хв⁻¹; 4 – $n = 920$ хв⁻¹

МСС не є характерним та оптимальним;

- допустима якість обмолоту (пошкодження зерна – до 2,0%) забезпечує МСС з частотою обертання молотильного барабана 860-920 хв⁻¹; такий режим характерний і використовується в комбайнах класичної схеми з пропускною здатністю молотарок від 5,0 до 14,0 кг/с;

- збільшення подачі в однобарабанну МСС від 1,7 до 14,5 кг/с при кожному з досліджуваних режимів – частоті обертання молотильного барабана від 800 до 920 хв⁻¹ – супроводжується покращенням якості зерна: кількість дробленого зерна зменшується від 4,30-2,97% до 1,60-0,27%, що відповідає агрономічним – не більше 2,0%.

Обговорення. У процесі обмолоту озимої пшениці з сухою соломою (вологість < 12%) комбайнами торгової марки «New Holland» оптимальний зазор між білами молотильного барабана та підбарабанням (відповідно «вхід»-«вихід») становив 12мм-12 мм (вологість 12-14%), оптимальний зазор становив 11мм-11мм, а для середньої (14-16%) або високої вологості (вологість > 16%) оптимальний зазор становив 10 мм-10 мм. Втрати зерна вдалося міні-

мізувати, у тому числі і за рахунок зменшення кількості дробленого зерна в складі бункерного до допустимих 0,05% шляхом збільшення частоти обертання молотильного барабана [Shpokas et al., 2008].

Проведено порівняльний тест для регулювання і фіксації зазору обмолоту та швидкості обертання молотильного барабана в режимі реального часу відповідно до зміни величини подачі хлібної маси. Результати засвідчили, що коли комбінацію робочих параметрів при різних обсягах подачі регулювати в режимі реального часу, втрати зерна становлять 0,65%, коефіцієнт недообмолоту – 0,063%, а коефіцієнт пошкодження (дроблення) – 0,47%. Порівняно з фіксованим зазором обмолоту та швидкістю обертання молотильного барабана коефіцієнт втрат від подачі, коефіцієнт недообмолоту та коефіцієнт дроблення зменшилися відповідно на 44,9%, 27,6% та 34,1%. Молотильний барабан зі змінним діаметром передбачений для зернозбирального комбайна великої продуктивності при плавному регулюванні молотильного зазора [Wang et al; 2010].

Математичний опис конструкцій-

но-технологічних параметрів повітряно-решітного очищення зернового вороху застосовано для імітаційної моделі технологічного процесу системи очищення зерна зернозбирального комбайна. На її базі розроблено методику визначення координат вузлових точок решітного стану для розрахунку швидкості їхнього переміщення, а також дослідження конструкційних і технологічних параметрів. У результаті визначено координати вузлових точок решітного стану системи очищення зерна, їхня швидкість і прискорення руху; розроблено математичну модель роботи решітного стану зернозбирального комбайна [Badretdinov et al., 2019].

З урахуванням визначальних факторів впливу на процеси обмолоту та сепарації і наявні втрати зерна у цьому процесі здійснено пошук і визначено оптимальні режими обмолоту для мінімізації втрат зерна за молотаркою залежно від параметрів технологічного процесу. Втрати при переміщенні обмолоченої маси залежать від частоти обертання молотильного ротора, периферійної швидкості ротора, інтенсивності подачі технологічного матеріалу, зазорів між ротором і молотильними деками, величини подачі хлібної маси в молотарку, щільності хлібної маси і довжини роторної молотильної системи [Vladut et al., 2023].

Розроблено комплексну унітарну стохастичну математичну модель обмолоту та сепарації зерна в аксіально-роторних і тангенціальних барабанних молотарках. Отримані рівняння описують і кількісно визначають відсоток необмолоченого зерна, вільного та відокремленого зерна за довжиною молотильного простору ротора або молотильно-сепарувальної дека барабанної системи. Вони дають змогу кількісно визначити втрати за молотаркою при обмолоті та сепарації зерна [Miu, Kutzbach, 2008].

Модель руху рослинного матеріалу через молотильний простір осьового молотильного агрегата підтверджена експериментальними даними з великої бази даних, отриманих під час лабораторних

випробувань. Це дає змогу використати її для практичного аналізу впливу руху матеріалу на продуктивність молотильного агрегата з точки зору сепарації та пошкодження, дроблення зерна, а також для конструкції молотильного агрегата та оптимізації процесу. Кінематична модель є важливою для прогнозування [Miu, Kutzbach, 2007].

Проведено дослідження та визначено оптимальні режими обмолоту для мінімізації втрат зерна за комбайном залежно від впливових параметрів систем обмолоту та сепарації. Використовуючи результати досліджень впливу оптимальних режимів обмолоту на мінімізацію втрат зерна за комбайном, можна визначити оптимальні режими обмолоту та їхній вплив на зміну втрат залежно від окружної швидкості ротора, потоку живлення, простору між ротор і молотильною декою [Vladut et al., 2023].

Висновки. Основними факторами, які найбільшою мірою зумовлюють механічне пошкодження (дроблення) зерна при певній вологості та оптимальних технологічних зазорах у класичній МСС, є величина подачі хлібної маси на обмолот і частота обертання молотильного барабана.

Багатофакторна математична модель показника дроблення зерна, до складу якої з різними коефіцієнтами-факторами входять показники подачі, технологічних зазорів МСС та частоти обертання молотильного барабана, з достатньою достовірністю характеризує якість зерна після його обмолоту в молотильно-сепарувальній системі барабанної молотарки класичного типу.

Графічна модель показника «дроблення зерна» дає змогу визначити оптимальний режим роботи молотильно-сепарувальної системи — величину подачі хлібної маси на обмолот у МСС та частоту обертання молотильного барабана з метою отримання зерна з допустимою кількістю дробленого (до 2 %). Такий режим роботи обмолоту хлібної маси в МСС забезпечить мінімальне пошкодження зерна.

Математичну та графічну моделі показника «дроблення зерна» доцільно ви-

користувати при виборі технологічного режиму роботи комбайна з класичною молотаркою і діаметром барабана в 600 мм – величини подачі та частоти обертання молотильного барабана для отримання зерна встановленої якості за вмістом подрібненого.

Перелік літератури

- Занько Н., Осипов Н. (1997). Моделирование потерь зерна за молотилкой комбайна. ISSN 0235-8573. «Тракторы и с.-х. машины». № 8. С. 27-28.
- Занько Н., Осипов Н. (1998). Влияние условий и режимов на качество работы зерноуборочного комбайна. ISBN 966-95554-0-X. Збірн. наук. праць: «Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для с.-г. України». Дослідницьке: УкрНДІПВТ. С. 108-114.
- Занько Н.Д. (2012). Моделювання технологічних режимів зернозбирального комбайна. Збірник наук. праць. Випуск 16 (30): «Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України». Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. С. 129-137.
- Кленин А.М., Егоров В.Г. (1971). Влияние угла наклона бычей ильного барабана на показатели работы молотильного устройства. «Тр-ры и с.-х. машины». № 3. С. 26-27.
- Осипов Н., Занько Н. (1997). Оптимизация режимов работы МСУ зерноуборочного комбайна. ISSN 0235-8573. «Тр-ры и с.-х. машины». № 4. С. 24 -25.
- Пугачёв А. (1976). Повреждение зерна машинами. Москва. «Колос». С. 146- 205.
- Халін С., Занько М., Гайдай Т., Степченко С., Ленъ О. (2023). Побудова математичної моделі показника «втрати зерна за молотаркою зернозбирального комбайна». ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого». «Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України». Збірник наукових праць. Випуск 33 (47). Дослідницьке. С. 35-47. https://www.ndipvt.com.ua/Zbyrnyk/Edition33_47/Collection_of_scientific
- Шалагинов Ю.В. (1981). Перспективы снижения механического повреждения семян. Науч.-техн. бюл.: Совершенствование технологических процессов уборки зерновых культур в сложных условиях Сибири. Новосибирск. С. 43-47.
- Aljibouri, M. A., Alsharifi, S. K. A., & Alaamer, S. A. (2022). A test of the threshing machine (LMS Type) at different feed rates and speeds on some corn properties. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1060, No. 1, p. 012133). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/1060/1/012133.
- Badretdinov, I., Mudarisov, S., Lukmanov, R., Permyakov, V., Ibragimov, R., & Nasyrov, R. (2019). Mathematical modeling and research of the work of the grain combine harvester cleaning system. Computers and Electronics in Agriculture, 165, 104966. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104966>.
- Cujbescu, D., Gageanu, I., & Iosif, A. (2021). Mathematical modeling of ear grain separation process depending on the length of the axial flow threshing apparatus. INMA Bucharest / Romania. Vol. 65, No. 3 / 2021. <https://doi.org/10.35633/inmateh-65-11>.
- Long, S., Xu, S., Zhang, Y., Zhang, J., & Wang, J. (2022). Effect of modeling parameters on the mechanical response of macroscopic crushing of agglomerate. Powder Technology, 408, 117720. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117720>.
- Miu, P. I., & Kutzbach, H. D. (2007). Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit. Computers and Electronics in Agriculture, 58(2), 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.04.002>.
- Miu, P. I., & Kutzbach, H. D. (2008). Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units - Part I. Computers and electronics in agriculture, 60(1), 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.07.003>.
- Qian, Z., Jin, C., Ni, Y., & Zhang, D. (2023). Modelling threshing using an en-

tropy regularisation approach with frictional contact dynamics and a flexible threshing mechanism. *Biosystems Engineering*, 226, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.01.001>.

Shpokas, L., Steponovych, D., Petkevichus, S. (2008). The influence of technological parameters of the threshing machine on grain damage. https://www.researchgate.net/publication/268268246_Impact_of_technological_parameters_of_threshing_apparatus_on_grain_damage#pf8.

Sun, D., Wang, Y., Xu, B., Fu, Y., Hou, Q., & Wang, X. (2020, June). Mathematical model and analysis of the crushing rate of combine harvester. In 2020 24th International Conference Electronics (pp. 1-6). IEEE.

Doi: 10.1109/IEEE-CONF49502.2020.9141622.

Vlăduț, N. V., Ungureanu, N., Biriș, S. Ș., Voicea, I., Nenciu, F., Găgeanu, I., & Teliban, G. C. (2023). Research on the Identification of Some Optimal Threshing and Separation Regimes in the Axial Flow Apparatus. *Agriculture*, 13(4), 838. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040838>.

Wang, F., Liu, Y., Li, Y., & Ji, K. (2023). Research and experiment on variable-diameter threshing drum with movable radial plates for combine harvester. *Agriculture*, 13(8), 1487. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081487>.

References

Aljibouri, M. A., Alsharifi, S. K. A., & Alaamer, S. A. (2022). A test of the threshing machine (LMS Type) at different feed rates and speeds on some corn properties. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1060, No. 1, p. 012133). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/1060/1/012133.

Badretdinov, I., Mudarisov, S., Lukmanov, R., Permyakov, V., Ibragimov, R., & Nasyrov, R. (2019). Mathematical modeling and research of the work of the grain combine harvester cleaning system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, 104966. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104966>.

doi.org/10.1016/j.compag.2019.104966.

Cujbescu, D., Gageanu, I., & Iosif, A. (2021). Mathematical modeling of ear grain separation process depending on the length of the axial flow threshing apparatus. *INMA Bucharest / Romania*. Vol. 65, No. 3 / 2021. <https://doi.org/10.35633/inmateh-65-11>.

Khalin S., Zanko M., Gaidai T., Stepchenko S., Len O. (2023). Construction of a mathematical model of the indicator «grain losses behind the thresher of the grain harvester». Technical and technological aspects of the development and testing of new equipment and technologies for the agriculture of Ukraine.» Collection of scientific. Works issue 33 (47). *Doslidnytske*. P. 35-47. https://www.ndipvt.com.ua/Zbyrnyk/Edition33_47/Collection_of_scientific_works_Edition_47_article_3.pdf

Klenin A.M., Egorov V.G. (1971). The influence of the angle of inclination of the bulls of the beef barabana on performance indicators of the threshing device. «Tr-ry and agricultural machines». No. 3. P. 26-27.

Long, S., Xu, S., Zhang, Y., Zhang, J., & Wang, J. (2022). Effect of modeling parameters on the mechanical response of macroscopic crushing of agglomerate. *Powder Technology*, 408, 117720. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117720>.

Miu, P. I., & Kutzbach, H. D. (2007). Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(2), 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.04.002>.

Miu, P. I., & Kutzbach, H. D. (2008). Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units - Part I. *Computers and electronics in agriculture*, 60(1), 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.07.003>.

Osyrov N.M., Zanko N.D. (1997). Optimization of the operating modes of the MSU of the grain harvester. ISSN 0235-8573. «Tr-ry and agricultural machines». No. 4. P. 24-25.

Pugachev A.N. (1976). Grain damage by machines. Moscow. «Ear». P. 146-205.

Qian, Z., Jin, C., Ni, Y., & Zhang, D. (2023). Modelling threshing using an entropy regularisation approach with friction-

al contact dynamics and a flexible threshing mechanism. *Biosystems Engineering*, 226, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.01.001>.

Shalaginov Yu.V. (1981). Prospects for reducing mechanical damage to seeds. *Scientific and technical Bull.: Improvement of technological processes of harvesting grain crops in difficult conditions of Siberia*. Novosibirsk. P. 43-47.

Shpokas, L., Steponovych, D., Petkevichus, S. (2008). The influence of technological parameters of the threshing machine on grain damage. https://www.researchgate.net/publication/268268246_Impact_of_technological_parameters_of_threshing_apparatus_on_grain_damage#pf8.

Sun, D., Wang, Y., Xu, B., Fu, Y., Hou, Q., & Wang, X. (2020, June). Mathematical model and analysis of the crushing rate of combine harvester. In 2020 24th International Conference Electronics (pp. 1-6). IEEE. Doi: 10.1109/IEEECONF49502.2020.9141622.

Vlăduț, N. V., Ungureanu, N., Biriș, S. Ș., Voicea, I., Nenciu, F., Găgeanu, I., & Teliban, G. C. (2023). Research on the Identification of Some Optimal Threshing and Separation Regimes in the Axial Flow Apparatus. *Agriculture*, 13(4), 838. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040838>.

org/10.3390/agriculture13040838.

Wang, F., Liu, Y., Li, Y., & Ji, K. (2023). Research and experiment on variable-diameter threshing drum with movable radial plates for combine harvester. *Agriculture*, 13(8), 1487. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081487>.

Zanko N., Osypov N. (1998). Influence of conditions and regimes on the quality of work of a grain harvester. ISBN 966-95554-0-X. Collection of science papers: «Technical - technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for rural and urban areas of Ukraine». Doslidnytske: Leonid Pogorilyy UkrNDIPVT. P. 108-114.

Zanko N.D. (2012). Modeling of technological modes of the grain harvester. Collection of sciences. Works issue 16 (30): «Technical and technological aspects of the development and testing of new equipment and technologies for the agriculture of Ukraine». Doslidnytske: Leonid Pogorilyy UkrNDIPVT. P. 129-137.

Zanko N.D., Osypov N.M. (1997). Modeling of grain loss at the combine threshing machine. ISSN 0235-8573. «Tractors and agricultural machinery». No. 8. P.27-28.

UDC 631.354.2.026.001.5

MATHEMATICAL AND GRAPHIC MODELING OF THE “GRAIN CRUSHING” INDICATORS OF A COMBINE HARVESTER

Khalin S., Candidate of Economy Sciences,

<https://orcid.org/0000-0002-7510-5056>,

Zanko M., Candidate of Technical Sciences,

<https://orcid.org/0000-0001-8964-0706>),

Haidai T., Candidate of Technical Sciences,

<https://orcid.org/0000-0001-9141-4820>,

Stepchenko S., <https://orcid.org/0000-0003-2808-9644>,

Len O., <https://orcid.org/0000-0003-0454-119X>

L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Summary

Purpose of the work - to investigate the technological process of the drum threshing and separating system (DTS) of a combine harvester with a drum thresher of the classical type and to determine the grain crushing indicators based on the results of multifactor mathematical and graphical modeling, taking into account the influence on the grain damage process of all factors inherent in the DTS of this type.

Methods and materials. When conducting experimental research, graphical and mathematical modeling, methods of analysis and synthesis were used. The synthesis method allows us to study the grain crushing index under the condition of the structural unity of the threshing machine systems. The analysis method allows us to study functional systems independently of other systems. Methods of mathematical and graphical modeling were used when constructing mathematical and graphical models of the grain loss index.

Results. A graphic diagram of the formation of the grain crushing index was constructed. It includes technological modes of operation, technical parameters of the MCC and agrophysical characteristics of grain and straw. Based on the results of experimental multifactorial studies, a multifactorial mathematical model and a graphic dependence of the grain crushing index were constructed.

Analysis of the graphic dependence showed that the least amount of grain is damaged at high-grain mass feeds to the MCC. The least grain is damaged during the operation of the threshing drum with a rotation frequency of 800 min⁻¹. Grain damage up to 2.0% is provided by the MCC with a threshing drum rotation frequency of 860-920 min⁻¹.

Conclusions. The mathematical model of the grain crushing index with sufficient reliability characterizes the quality of grain after its threshing in the MCC of a classical-type thresher. The main factors that determine grain crushing to the greatest extent are the frequency of rotation of the threshing drum and the amount of grain mass supplied to the threshing machine. The graphical model of the grain crushing index allows you to determine the optimal mode of operation of the MCC to obtain grain with an acceptable amount of crushed grain.

Keywords: combine harvester, threshing-separating system, threshing drum rotation frequency, grain mass feed for threshing; mathematical model, graphic modeling.