

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОДАЧІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МАСИ В МОЛОТАРКУ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА

Халін С., канд. екон. наук,
<https://orcid.org/0000-0002-7510-5056>

Гайдай Т., канд. техн. наук,
<https://orcid.org/0000-0001-9141-4820>,

Занько М., канд. техн. наук,
<https://orcid.org/0000-0001-8964-0706>),

Степченко С.,
<https://orcid.org/0000-0003-2808-9644>,

Лень О.
<https://orcid.org/0000-0003-0454-119X>

УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Анотація

Мета роботи – розробити й дослідити багатофакторну математичну модель подачі зернозбирального комбайна з урахуванням множини факторів, які впливають на формування її величини.

Методи і матеріали. Розробку математичної моделі показника втрат зерна виконано із застосуванням методів математичного моделювання; її оцінку виконано з використанням критерію Фішера. Дослідження подачі технологічної маси проведено на багатофакторному рівні залежно від технічних параметрів і технологічних режимів систем комбайна та характеристики технологічної культури. Багатофакторні експериментальні дослідження показника подачі технологічної маси проведені у ході роботи комбайна в режимі прямого комбайнування. До експерименту залучено 14 однотипних комбайнів із молотаркою барабанного типу.

Результати. За результатами аналізу отриманих статистичних даних зроблено такі висновки: збільшення ширини молотарки, площі соломотрусу, енергозабезпечення комбайна, ширини захвату зернової жатки, урожаю зерна технологічної культури та робочої швидкості сприяє збільшенню подачі хлібної маси в молотарку комбайна.

Розроблено багатофакторну математичну модель показника подачі технологічної маси. На основі отриманої математичної моделі підготовлено графічні залежності показника подачі від ширини захвату жнивarki, урожайності зерна колосової культури та ширини молотарки, які обумовлюють технологічний режим роботи комбайна – подачу хлібної маси на обмолот. Їхнє використання дає змогу вибрати для молотарки конкретних параметрів необхідну робочу швидкість комбайна, щоб сформувати в молотарку потік технологічної маси необхідної продуктивності - подачі. У ході роботи в однакових умовах (на одному полі) продуктивність комбайнів визначатиметься величиною подачі хлібної маси в комбайн, яку обумовлюють жнивarka, молотарка та робоча швидкість руху при виконанні технологічного процесу.

Висновки. Установлено, що технологічна пропускна здатність молотарки до обмолоту хлібної маси визначається її технічними параметрами. Використання молотарки зі значним діаметром молотильного барабана (поряд із відповідними збільшеними іншими параметрами молотильної системи) сприяє продуктивності проходження/подачі та технологічної переробки в молотильно-сепарувальній системі, що сприяє збільшенню подачі хлібної маси на обмолот та здатності комбайна працювати в режимі проектної продуктивності.

Графічні моделі показника подачі доцільно використовувати при виборі технологічного режиму комбайна – робочої швидкості – залежно від його проектної продуктивності, ширини захвату жни-

варки та врожайності зерна колосових культур.

Ключові слова: зернозбиральний комбайн, молотарка барабанного типу, подача хлібної маси, обмолот зерна, зернова жатка.

Вступ. Продуктивність подачі зрізаної маси технологічної культури в молотарку зернозбирального комбайна прийнято виражати через показник призначення, який вперше запропоновано у 1910 р. для характеристики технологічного режиму, в якому працює молотильна система [Горячкин, 1965].

На вищезазначене також впливають два важливі фактори: пропускна здатність (інтенсивність подачі), яка є функцією швидкості комбайна та врожайності, і продуктивність молотарки, яка є функцією від режиму роботи молотильної системи та її технічних розмірів [Trollope, 1982; Miu & Kutzbach, 2000].

За понад столітній період інтенсивного розвитку конструкції комбайна, цей показник, як і раніше, є основним фактором у ході досліджень пропускної спроможності молотарки. Аналіз результатів досліджень показника подачі свідчать про спрощений підхід до його вираження у зв'язку з дуже обмеженими факторами [Гуров та ін., 1964; Хробостов, 1973; Фортуну, 1979].

Максимальне значення величини подачі Q (кг/с) при експериментальній оцінці комбайна визначається з умови, що для повного вимолоту зерна з хлібної маси та отримання встановленої якості роботи (втрати зерна – не більше допустимих 1,5%), вона не повинна перевищувати пропускну спроможність комбайна – q (кг/с) [Хробостов, 1973].

У ході досліджень комбайнів різних типів акцент робиться на експериментальне дослідження молотарок із урахуванням технологічних налаштувань, організації та управління всім ланцюгом збирання врожаю та контролю якості роботи. При цьому вимірюються конструкційні параметри кожного молотильного апарата, визначається годинна продуктивність кожного комбайна і питомі витрати дизельного палива на тонну зібраної сільськогосподар-

ської культури. Практично в усьому світі є тенденція використання у збиральних комбайнів із двопотоковими молотарками і тангенціальною подачею хлібної маси на обмолот [Duma Corsea et al., 2023].

У користувачів і підприємств є нагальний попит на дані про продуктивність польової роботи зернозбирального комбайна. Для цього застосовується онлайн-система оцінки продуктивності польової роботи зернозбирального комбайна та інформація про параметри польової роботи зернозбирального комбайна в режимі реального часу. Цією системою зокрема визначається індекс оцінки продуктивності польової роботи тестової моделі та встановлюється система оцінки продуктивності польової роботи зернозбирального комбайна на основі марковської моделі оцінки. Система розподіляє рівні оціночних індексів зернозбирального комбайна, визначає ваговий коефіцієнт індексу ентропійним методом і за рівнем прогресу матриці ймовірних переходів оцінює продуктивність польової роботи зернозбирального комбайна [Chen et al., 2022].

Досягнення встановленої подачі при роздільному збиранні хлібів можливе за рахунок робочої швидкості та потужності валка технологічної культури [Гуров та ін., 1964]:

Моніторинг швидкості подачі маси в комбайн в режимі реального часу має велике значення для підвищення ефективності збирання. Розроблено систему моніторингу швидкості подачі. Система складається з датчика крутного моменту приводного валу жатки, датчика для вимірювання висоти зрізу маси жаткою, датчика вологості зерна, приймача глобальної навігаційної супутникової системи та промислового комп'ютера комбайна. Такі дані, як вміст вологи в зерні та робоче положення комбайна, збираються системою під час збирання врожаю, а по-

тім реалізується в моніторинг швидкості подачі в реальному часі [Yifan et al., 2022].

Важливим аспектом є вибір оптимальних режимів роботи комбайна. Це дає змогу підвищити його продуктивність і якість механізованого збирання хлібів. Для нормального функціонування самохідних комбайнів у ході роботи необхідний ряд технологічних налагоджень. Щоб зробити ефективним використання комбайнів у роботі, розроблено детальну документацію щодо останніх типів молотарок і систем очищення, враховуючи, що продуктивність комбайнів значною мірою залежить від потужності потоку маси на обмолот і функціональної здатності системи очищення [Demeter et al., 2021].

Вибір високопродуктивного комбайну до використання є багатокритеріальним і досить дискусійним. На його високу продуктивність, окрім рівня технологій конструювання, значний вплив має адаптованість до умов збирання врожаю. На ринку є два підходи до вирішення завдання — у стислі терміни зібрати величезні обсяги зернових із найменшими втратами: використовувати більшу кількість стандартних комбайнів (6-7-х груп потужності) із жатками шириною захвату 7-8 м або меншу кількість потужніших машин (групи 9+) із широкими жатками.

Електронна система «Active Yield» (компанія «CLAAS») дає змогу визначити врожайність, вологу вагу зерна та час заповнення бункера, виконуючи постійне калібрування показань датчика врожайності. Це дає змогу створювати калібрувальну криву на різних робочих швидкостях і рівнях продуктивності комбайна та, відповідно, більш точно виконувати робочі завдання.

Аналіз свідчить про таке: до складу залежностей як фактори не входять параметри молотарки — основної системи, що визначає здатність комбайна не тільки отримати до обмолоту, а й переробити відповідно до вимог технологічний потік [Фортуна, 1979]. З наукової точки зору такий експеримент не відповідає об'єктивності досліджень такої складної системи

як зернозбиральний комбайн та процесу формування показника Q . Це унеможливорює дослідження його величини в комплексному поєднанні з технічними параметрами, які є активними факторами під час його формування.

При виконанні технологічного процесу залежно від умов і режиму роботи абсолютне значення подачі варіює в діапазоні від мінімального значення — близького до нуля — до певного максимального значення, яке для кожного комбайна є індивідуальним. Однак немає вираження цього показника у вигляді залежності, моделі або функції, які можна було б використовувати для таких досліджень.

Мета дослідження — розробити й дослідити багатофакторну математичну модель подачі зернозбирального комбайна з урахуванням множини факторів, які впливають на її величину.

Постановка завдань. Для побудови багатофакторної математичної моделі показника подачі необхідно:

- реалізувати в польових умовах багатофакторний експеримент на базі групи комбайнів барабанного типу з дослідження величини подачі технологічної маси в молотарку;
- побудувати багатофакторну математичну модель подачі технологічної маси;
- розробити багатофакторні графічні залежності подачі технологічної маси та провести їхній аналіз.

Методи і матеріали. Для експериментальних досліджень технологічної маси подачі в складі зернозбирального комбайна застосовано методи аналізу, які дають змогу досліджувати подачу технологічної маси з урахуванням характеристик хлібної маси, інших технологічних режимів і технічних параметрів молотарки як системи. Розробку математичної моделі показника подачі технологічної маси виконано із застосуванням методів математичного моделювання; її оцінку виконано із використанням критерію Фішера.

Результати досліджень. Формування та вираження показника подачі технологічної маси слід розглядати з позицій сис-

Таблиця 1 – План експерименту та результати дослідження подачі технологічної маси

№ ком- байна	Фактори впливу								Оцінювальний показник
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-	$N_{дв.}$	S_c	D_b	$B_{ж}$	n	B_m	V_p	Y_z	Q
1	57	2,3	600	2,8	850	800	2,0	42,5	0,9
	57	2,3	600	2,8	850	800	2,6	42,5	1,3
	57	2,3	600	2,8	850	800	3,3	42,5	1,7
	57	2,3	600	2,8	850	800	4,5	42,5	2,6
2	85	5,2	600	4,3	1000	1278	2,1	48,2	2,3
	85	5,2	600	4,3	1000	1278	2,9	48,2	3,4
	85	5,2	600	4,3	1000	1278	3,3	48,2	4,1
	85	5,2	600	4,3	1000	1278	5,0	48,2	5,2
	85	5,2	600	4,3	1000	1278	5,5	48,2	6,3
	85	5,2	600	4,3	1000	1278	6,0	48,2	7,9
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	245	6,5	600	7,2	1050	1626	2,7	73,0	6,9
	245	6,5	600	7,2	1050	1626	3,1	73,0	7,9
	245	6,5	600	7,2	1050	1626	4,0	73,0	10,2
	245	6,5	600	7,2	1050	1626	4,7	73,0	14,7

теми «комбайн», до складу якої, поряд із досліджуваним показником Q , входять також технічні параметри і технологічні режими комбайна та умови роботи – характеристики хлібної маси. Його дослідження доцільно проводити на багатофакторному рівні відповідно до залежності:

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

де X_i – технічні параметри систем комбайна; U_i – технологічні режими систем комбайна; Z_i – характеристики технологічної культури.

Багатофакторні експериментальні дослідження показника Q відповідно до залежності (1) проведені у ході роботи комбайна в режимі прямого комбайнування озимої пшениці (табл. 1). До експерименту залучено 14 однотипних комбайнів із молотаркою барабанного типу, які мають пропускну здатність 3-10 кг/с. Подача хлібної маси і пропускна спроможність молотарки при цьому на певному рівні (згідно з рівнем втрат зерна за молотаркою) при виконанні технологічного процесу досягаються за рахунок робочої

швидкості комбайна, ширини захвату жнивarki та врожайності хлібостою. Активним фактором впливу на подачу визначено робочу швидкість руху комбайна.

Іншими факторами, що впливають на формування подачі для цього комбайна, прийняті параметри молотильно-сепарувальної системи (МСС) та системи сепарації зерна з грубого вороху. До експериментальних досліджень подачі факторами визначені також параметри показників призначення комбайна: потужність двигуна ($N_{дв} = [57 - 245]$ кВт), площа системи остаточної сепарації зерна – соломотрясу ($S_c = [2,30 - 6,50]$ м²), діаметр молотильного барабана ($D_b = [450-800]$ мм), ширина захвату жнивarki ($B_{ж} = [2,8-7,2]$ м), частота обертання молотильного барабана ($n = [800 - 1050]$ хв⁻¹), ширина молотарки ($B = [800 - 1700]$ мм), робоча швидкість руху комбайна ($V_p = [2,0 - 8,13]$ км/год), урожайність зерна ($Y_z = [42,5 - 73,0]$ ц/га). При такому значному діапазоні технічних параметрів, умов і режимів роботи досягнуто подачі хлібної маси в молотарку в діапазоні $[0,90-14,7]$ кг/с.

Аналіз результатів досліджень свідчить

(табл. 1), що використання більш потужної молотарки згідно з її шириною та площею соломотрусу, потужного двигуна та зернової жатки зі значною шириною захвату та обмолот хлібів високої урожайності в режимі високої робочої швидкості сприяє формуванню високого показника подачі хлібної маси в молотарку комбайна.

Для розроблення конкретної залежності й опрацювання значного обсягу багатфакторних статистичних даних (табл. 1) використано метод математичного моделювання. Він дає змогу визначити математичну залежність показника Q з технічними параметрами та технологічними режимами комбайна в динаміці технологічного процесу та розрахувати значення величини подачі залежно від зміни цих факторів.

Синтез багатфакторної залежності типу (1) на базі сформованого в ході досліджень масиву даних (табл. 1) виконано з використанням прикладної математичної програми. Отримано багатфакторну математичну залежність (2) і на її основі — графічні моделі показника Q (рис. 1-3), які адекватно описують основні причинно-наслідкові його зв'язки і містять конкретно встановлені та вимірювані вхідні змінні — фактори:

$$Q = 0,2756 \cdot 10^{-4} \cdot n_6 \cdot U_3 \cdot V_p - 0,01018 \cdot B_m / (S_c \cdot B_j) - 97,2737 \cdot U_3 / (S_c \cdot D_6) + 0,7271 \cdot 10^{-2} \cdot D_6 \cdot B_j / S_c - 2639,5278 \cdot U_3 / (N_{дв} \cdot n_6), \quad (2)$$

де Q — подача хлібної маси в молотарку комбайна, кг/с; D_6 — діаметр молотильного барабана, мм; V_p — робоча швидкість руху комбайна, км/год;

U_3 — урожайність зерна, ц/га; B_m — ширина молотарки, мм; B — робоча ширина захвату жниварки комбайна, м; S_c — пло-

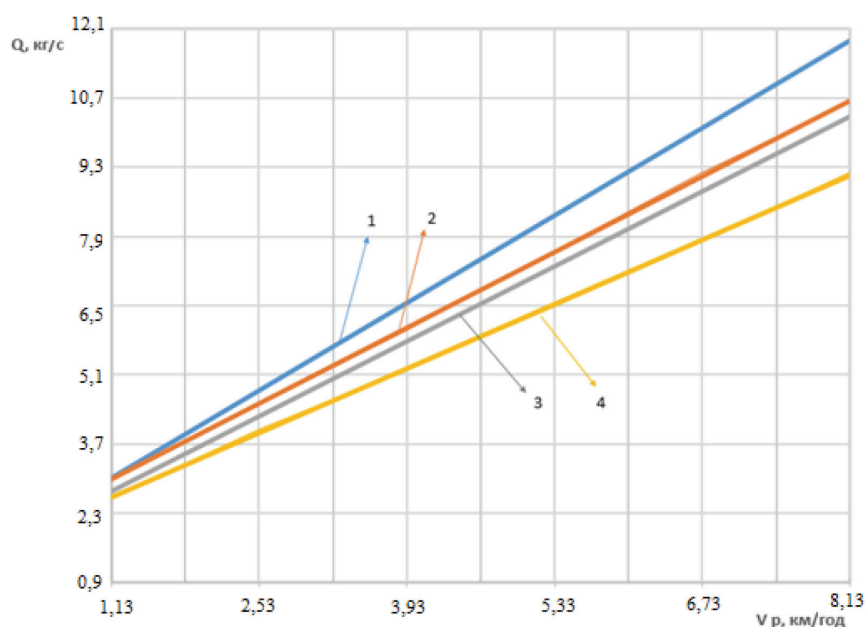


Рисунок 1 – Залежність подачі технологічної маси від робочої швидкості комбайна та ширини молотарки $Q = f(V_p; B_m)$:
1) $B = 800$ мм; 2) $B = 1200$ мм; 3) $B = 1278$ мм; 4) $B = 1600$ мм

ща сепарації зерна (соломотрусу), м²;
 n_6 — частота обертання барабана, об/хв.

Оцінку відповідності даних математичного моделювання показника Q отриманим експериментальним даним проведено за критерієм Фішера. Середньоквадратична похибка показника Q моделі (2) менша 3%, що дає змогу стверджувати про її адекватність. На основі математичної моделі розроблено графічні залежності подачі технологічної маси від робочої швидкості комбайна, ширини захвату жниварки, діаметра молотильного барабана й урожайності зерна колосової культури (рис. 1-3), які обумовлюють технологічний режим роботи комбайна — подачу хлібної маси на обмолот.

Використання графічної залежності $Q = f(V_p; B_m)$ (рис. 1) дає змогу вибрати для молотарки певної ширини необхідну робочу швидкість комбайна, щоб сформувати в молотарку потік технологічної маси необхідної продуктивності — подачі. Збільшення робочої швидкості комбайна дає змогу збільшити технологічний потік і подачу хлібної маси на обмолот у молотарку.

У ході роботи комбайнів із різною

пропускною спроможністю в ідентичних технологічних режимах та умовах — робоча ширина захвату жниварки, швидкість руху та врожайність хлібної маси — подача хлібної маси в молотарку, а значить, і подача будуть менші у молотарки з більшою шириною (рис. 1).

Графічна залежність $Q = f(B; U_z)$ (рис. 2) свідчить, що збільшення врожайності зерна дає змогу збільшити подачу, а тим самим — продуктивність комбайна.

Технічні параметри молотильної системи значною мірою визначають функціональну здатність комбайна — подачу та пропускну здатність, з якими комбайн може працювати при обмолоті хлібів. При використанні в складі комбайна продуктивної молотильної системи, в якій використано молотильний барабан збільшеного діаметра (наприклад, 800 мм) та робочої швидкості на рівні 8 км/год буде забезпечена робота з подачею хлібної маси на обмолот (урожайність зерна — 73 ц/га) на рівні 11,5 кг/с (рис. 3).

Тобто, при роботі в однакових умовах (на одному полі) продуктивність різних комбайнів визначатиметься величиною подачі хлібної маси в комбайн, яку дає змогу формувати жниварка, рух комбайна з певною робочою швидкістю та здатність молотарки виконати обмолот поданої маси з регламентованою якістю (втрати зерна за молотаркою — не більше 1,5%).

Обговорення. За результатами експериментальних досліджень зроблено висно-

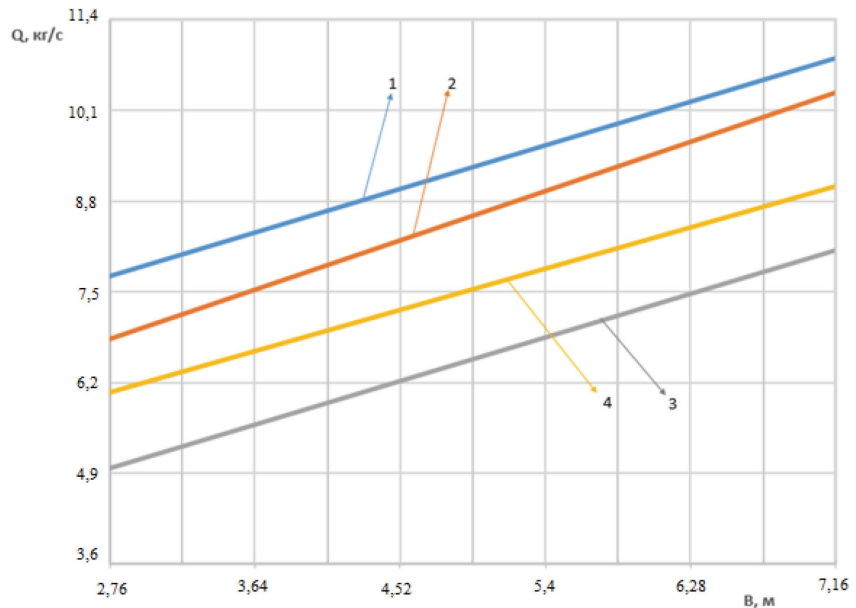


Рисунок 2 – Залежність подачі хлібної маси в молотарку від ширини захвату жниварки та врожайності зерна $Q = f(B; U_z)$:

- 1) $U_z = 73,0$ ц/га; 2) $U_z = 62,0$ ц/га; 3) $U_z = 38,9$ ц/га;
4) $U_z = 50,0$ ц/га

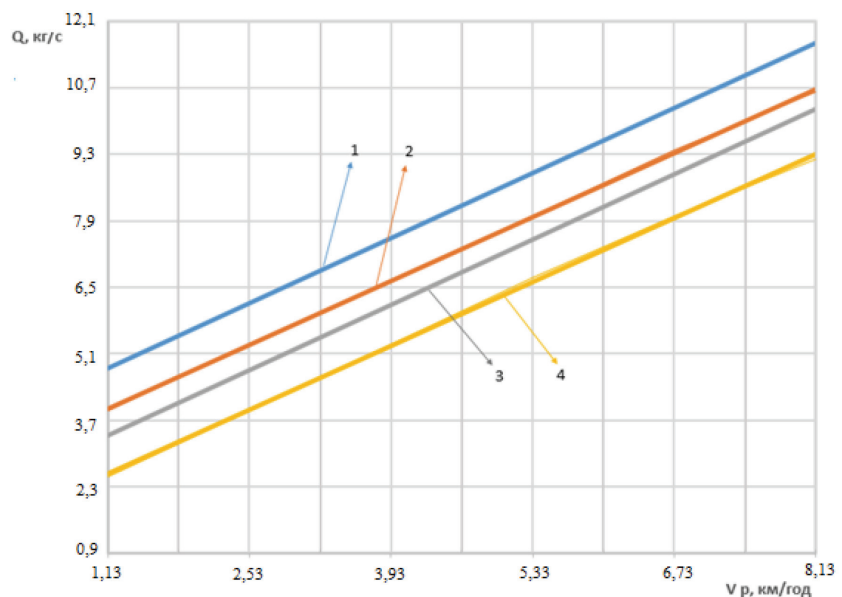


Рисунок 3 – Залежність подачі хлібної маси в молотарку від робочої швидкості комбайна та діаметра молотильного барабана $Q = f(V_p; D_6)$:

- 1) $D_6 = 800$ мм; 2) $D_6 = 700$ мм; 3) $D_6 = 600$ мм;
4) $D_6 = 550$ мм.

вок, що основний вплив на продуктивність намоту визначає молотильна система. Інші фактори процесу прямого комбайнування — зернова жатка та характеристики хлібної маси — не розглядаються.

Отримані авторами залежності дають змогу шляхом нескладних перетворень і розрахунків отримати величину показни-

ка подачі. Однак до їхнього складу не входять технічні параметри молотарки, що не дає змогу оцінити пропускну здатність молотарки технологічно зі встановленою якістю переробки маси.

Онлайн-система оцінки продуктивності польової роботи комбайна має високу чутливість до зміни кожного показника порівняно з ручним методом, що дає змогу встановити середні абсолютні похибки показників подрібнення та засміченості бункерного зерна й інтенсивності втрат при роботі комбайна. Запропонована система оцінки продуктивності роботи в полі дає змогу в режимі реального часу точно відображати й оцінювати продуктивність роботи зернозбирального комбайна в динаміці його роботи. Запропонована система може реалізовувати динамічний моніторинг показників польової роботи комбайна. Окрім того, інтелектуальна система оцінки продуктивності зернозбирального комбайна може забезпечити технічну підтримку інтелектуального збирання врожаю комбайном, хоча такі можливості є не в кожному господарстві [Chen et al., 2022].

Проаналізувавши в експериментальній зоні метод оцінки інформації про розподіл урожаю рису, який встановлює бінарну лінійну модель між висотою зрізаної жатки, вмістом вологи в зерні та співвідношенням соломи до зерна, що подається в жатку, відмічаємо, що модель поєднується з результатами моніторингу швидкості подачі для отримання даних про врожайність рису, що подається в комбайн. Потім дані про врожайність рису зіставляються з позиційною інформацією на момент збирання, щоб отримати карту розподілу врожаю на зібраній площі. За результатами іноземних досліджень, точність оцінки розподілу врожайності перевищує 90%, що забезпечує наукову основу для ухвалення сільськогосподарських рішень [Yifan et al., 2022].

Результати досліджень засвідчують, що комбайн із оптимізованими технологічними параметрами, до яких відноситься частота обертання молотильного

барабана, забезпечує продуктивність, яка на 20% може бути більшою за продуктивність комбайна з неоптимізованими параметрами [Demeter et al., 2021].

При різних рівнях подачі іноземними науковцями проведено порівняльний тест для регулювання та фіксації зазору в системі обмолоту і швидкості обертання молотильного барабана відповідно до зміни кількості подачі. Результати показали, що коли комбінацію технологічних режимів, у тому числі подачу регулювати в режимі реального часу, втрати зерна становлять 0,65%, недомолот — 0,063% і дроблення — 0,47%. Порівняно з фіксованим зазором у системі обмолоту та швидкістю обертання молотильного барабана коефіцієнт втрат від величини подачі, недообмолоту та дроблення зерна зменшилися відповідно на 44,9%, 27,6% та 34,1% [Wang et al., 2023].

Обмолот і сепарація в потужній молотильній системі є більш продуктивними та якісними, ніж у молотильних системах інших типів. Продуктивність систем обмолоту та сепарації зерна значно покращується завдяки оптимізації структури молотильних органів і факторів, що входять до складу моделі досліджуваних систем, за даними дослідників університету Цзянсу [Tang et al., 2014; Zhong et al., 2014].

При проектуванні високопродуктивних комбайнів акцент робиться на підвищення продуктивності системи обмолоту. Для аграрних підприємств із площами посівів сільськогосподарських культур 1000–3000 га, що підлягають комбайновому обмолоту, сучасний високопродуктивний зернозбиральний комбайн позиціонується з двигуном потужністю 600 к.с., шириною захвату жниварки 8–10 м та об'ємом бункера для зерна в 15 м³ [Бурлака, 2022].

Оцінка сучасного зернозбирального комбайна проводиться за результатами аналітичних багатокритеріальних досліджень. При цьому враховуються особливості конструкції молотильно-сепарувальних систем комбайнів та особливості збирання різноманітних сільськогосподарських культур. Однак основними порівнювальними критеріями є номіналь-

на потужність двигуна, площа сепарації зерна молотарки, площа решіт очистки, місткість бункера.

Цікавим рішенням від «John Deere» є система «Active Terrain Adjustment», яка автоматично регулює усі налаштування системи очищення: швидкість вентилятора, зазор верхнього та нижнього решіт під час руху комбайна нерівною поверхнею з урахуванням особливостей збираної культури. Це не лише знижує рівень втрат зерна та підвищує його якість, але й дає операторові змогу зосередитися на управлінні машиною, що істотно підвищує безпеку та зберігає проектну продуктивність збирання врожаю.

Висновки. Розроблена багатофакторна математична модель, у якій факторами визначені технічні параметри основних систем комбайна — жатки, молотильно-сепарувальної системи, соломотрусу і двигуна — та характеристики хлібної маси, відображає залежність подачі від їхньої величини з достатньою достовірністю.

Установлено, що технологічна здатність молотарки — подача/пропускна здатність до обмолоту хлібної маси визначається її технічними параметрами. Тому використання молотарки зі значним діаметром молотильного барабана разом із відповідними збільшеними іншими параметрами молотильної системи сприяє продуктивності проходження/подачі та технологічної переробки в МСС, що сприяє збільшенню подачі та здатності комбайна працювати в режимі проектної продуктивності.

Графічні моделі показника подачі доцільно використовувати при виборі технологічного режиму комбайна — робочої швидкості залежно від його проектної продуктивності, ширини захвату жнивarki та врожайності зерна колосових культур.

Перелік літератури

Бурлака О., Яхін С., Дудник В., Іванкова О., Дрожжана О. (2019). Багатокритеріальний вибір сучасних зер-

нозбиральних комбайнів. Аналітичні аспекти. Вісник ХНТУСГ. Технічні науки. Випуск 199. URL: <https://dspace.pdau.edu.ua/items/5f69da76-ed44-4332-9881-9107c23ac912>

Горячкин, В. (1965). Собрание сочинений. М.: Колос,. Т.3. С. 161.

Гуров, И., Кленин, Н., Попов, И., Смирнов, И. (1964). Машины для уборки и обработки зерновых культур. Теория, конструкция, расчет. Учебное пособие. М.: «Машиностроение». С. 187-188.

Фортуна, В. (1979). Эксплуатация машинно-тракторного парка / Учебники и учебные пособия. М.: «Колос». С. 214.

Хробостов, С. (1973). Эксплуатация машинно-тракторного парка / Учебники и учебные пособия. М.: «Колос». С. 475.

Chen, M., Jin, C., Ni, Y., Yang, T., & Zhang, G. (2022). Online field performance evaluation system of a grain combine harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107047.

Demeter, A., Truțan, R., Nagy, V., Duma C., Casiana M. (2021). Working capacity of grain harvesters. *Research Journal of Agricultural Science*, Vol 53, Issue 3, p.93.

Duma Copcea, A., Mihuț, C., Niță, L., Scedei, D., Adalbert, O., Bungescu, S., & Sorbu, C. (2023). Studies on the dynamics of threshing appliances of cereal harvesting combines. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 66(2).

Miu, P. I., & Kutzbach, H. D. (2000). Simulation of threshing and separation processes in threshing units. *Agrartechnische Forschung*, 6, 1-7. DOI: 10.1016/j.compag.2007.07.003

Tang, Z., Li, Y., Xu, L., & Kumi, F. (2014). Modeling and design of a combined transverse and axial flow threshing unit for rice harvesters. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(4), 973-983.

Trollope, J. R. (1982). A mathematical model of the threshing process in a conventional combine-thresher. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 27(2), 119-130. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(82\)90098-1](https://doi.org/10.1016/0021-8634(82)90098-1)

Wang F, Liu Y, Li Y, Ji K. (2023). Re-

search and experiment on variable-diameter threshing drum with movable radial plates for combine harvester. *Agriculture* 2023, 13(8), 1487; DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081487>

Yifan, S., Renjie, L., Man, Z., Minzan, L., Zhenqian, Z., Han, L. (2022). Design of feed rate monitoring system and estimation method for yield distribution information on combine harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 201. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169922006329>.

Zhong, T., Yaoming, L., & Lizhang, X. (2014). Design and optimization for length of longitudinal-flow threshing cylinder of combine harvester. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(23).

References

Burlaka O., Yakhin S., Dudnyk V., Ivan-kova O., Drozchana O. (2019). Multi-criteria selection of modern grain harvesters. Analytical aspects. *Herald of KhNTUSG. Technical sciences*. Issue 199. URL: <https://dspace.pdau.edu.ua/items/5f69da76-ed44-4332-9881-9107c23ac912>

Chen, M., Jin, C., Ni, Y., Yang, T., & Zhang, G. (2022). Online field performance evaluation system of a grain combine harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107047.

Demeter, A., Truțan, R., Nagy, V., Duma C., Casiana M. (2021). Working capacity of grain harvesters. *Research Journal of Agricultural Science*, Vol 53, Issue 3, p.93.

Duma Copcea, A., Mihaș, C., Niță, L., Scedei, D., Adalbert, O., Bungescu, S., & Sorbu, C. (2023). Studies on the dynamics of threshing appliances of cereal harvesting combines. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 66(2).

Fortuna, V. (1979). Operation of the machine and tractor park / Textbooks and textbooks allowance M.: «Colossus». P. 214.

Gurov, I., Klenyn, N., Popov, I., Smirnov, I. (1964). Machines for cleaning and processing grain crops. Theory, design, cal-

culation. Educational allowance M.: «Mashinostroenie». P. 187-188.

Horyachkin, V. (1965). Gathered composed M.: Kolos. T.3. P. 161.

Khrobostov, S. (1973). Operation of the machine and tractor park / Textbooks and textbooks allowance M.: «Colossus». P. 475.

Miu, P. I., & Kutzbach, H. D. (2000). Simulation of threshing and separation processes in threshing units. *Agrartechnische Forschung*, 6, 1-7. DOI: 10.1016/j.compag.2007.07.003

Tang, Z., Li, Y., Xu, L., & Kumi, F. (2014). Modeling and design of a combined transverse and axial flow threshing unit for rice harvesters. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(4), 973-983.

Trollope, J. R. (1982). A mathematical model of the threshing process in a conventional combine-thresher. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 27(2), 119-130. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(82\)90098-1](https://doi.org/10.1016/0021-8634(82)90098-1)

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* 2023, 13(8), 1487; DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081487>

Yifan, S., Renjie, L., Man, Z., Minzan, L., Zhenqian, Z., Han, L. (2022). Design of feed rate monitoring system and estimation method for yield distribution information on combine harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 201. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169922006329>

Zhong, T., Yaoming, L., & Lizhang, X. (2014). Design and optimization for length of longitudinal-flow threshing cylinder of combine harvester. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(23).

UDC 631.354.2.026.001.5

CONSTRUCTION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF TECHNOLOGICAL MASS SUPPLY INTO THE THRESHER OF THE GRAIN HARVESTING COMBINE

Khalin S., Ph. D. Econ. Sc.,

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

Haidai T., Ph. D. Tech. Sc.,

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

Zanko M., Ph. D. Tech. Sc.,

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

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 research: to develop and research a multifactorial mathematical model of the feed of the grain harvester, taking into account several factors that influence the formation of its value.

Methods and materials. The development of a mathematical model of the grain loss indicator was carried out using mathematical modeling methods; its assessment was performed using Fisher's test. The study of the supply of technological mass was carried out at the multifactorial level depending on the technical parameters and technological modes of the harvester systems and the characteristics of the technological culture. Multifactorial experimental studies of the technological mass supply indicator were carried out during the operation of the combine in the direct combine mode. 14 combines of the same type with a drum-type thresher were included in the experiment.

Results. Based on the results of the obtained statistical data analysis, it was concluded that an increase in the width of the thresher, the area of the straw shaker, the energy supply of the combine, the width of the grain header, the grain yield of the technological crop and the working speed contribute to the increase in the supply of bread mass to the thresher of the combine.

A multifactorial mathematical model of the technological mass supply indicator was developed. Based on the obtained mathematical model, graphical dependences of the feed rate on the width of the harvester's grip, the grain yield of the ear crop and the width of the thresher were developed, which determine the technological mode of operation of the combine - the supply of bread mass to threshing. Their use makes it possible to choose the necessary working speed of the combine for the thresher of specific parameters, in order to form a flow of technological mass of the required productivity - feed into the thresher. When working in the same conditions (on the same field), the productivity of combines will be determined by the amount of bread mass supplied to the combine, which is determined by the harvester, thresher, and the working speed of movement during the execution of the technological process.

Conclusions. It has been established that the technological throughput capacity of the thresher for threshing bread mass is determined by its technical parameters. The use of a thresher with a significant diameter of the threshing drum (along with correspondingly increased other parameters of the threshing system) contributes to the productivity of passing/feeding and technological processing in the threshing-separating system, which serves to increase the supply of bread mass to the threshing machine and the ability of the combine to work in the mode of design productivity.

It is advisable to use graphic models of the feed indicator when choosing the technological mode of the combined harvester - working speed, depending on its design productivity, the width of the harvester's grip, and the grain yield of ear crops.

Keywords: grain harvester, drum-type thresher, feed of bread mass, grain threshing, grain harvester.