

ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

В. Войтюк, *д-р. техн. наук,*

О. Демко, *канд. техн. наук,*

І. Роговський, *канд. техн. наук,*

*Національний університет біоресурсів і природокористування
України*

У статті розглядається питання підвищення продуктивності зернозбирального комбайна (далі – ЗК) завдяки ефективному використанню технічних і технологічних факторів із контролем механічних втрат зерна за молотильно-сепарувальним пристроєм (далі – МСП).

Аналіз опублікованих робіт дозволив виявити, що поза аналізом науковців залишилися дослідження ефективності використання технічних характеристик, закладених у конструкції ЗК, зокрема, завантаження двигуна, пропускної здатності МСП та енергетичних показників: питомої витрати потужності на обмолот, витрати палива на одну тонну і один га, механічних втрат зерна за комбайном. Теоретичні дослідження дозволили виявити вплив технічних і технологічних факторів, (строкатності урожайності, агробіологічного стану хлібної маси) на пропускну здатність і, відповідно, на продуктивність і на їх похідну – втрати зерна на МСП ЗК.

Аналітично визначено залежність швидкості руху комбайна в загінці від завантаження і потужності двигуна. Розроблено інтегральний метод визначення пропускної здатності МСП, досліджено вплив нерівномірності і флуктуації урожайності по площі поля на пропускну здатність МСП і зміну крутного моменту на валу барабана, залежність продуктивності ЗК через пропускну здатність від відносних значень механічних втрат за МСП ЗК. Вперше досліджено роль і значимість механічних втрат зерна за МСП під час визначенні ефективності використання ЗК. Визначено, що числові значення механічних втрат змінюються залежно від агробіологічних характеристик хлібостою. Середні значення числових втрат характеризуються коефіцієнтом варіації в межах $K_v = 0,3 - 0,8$ і максимальні викиди верхніх значень попадають у червону зону приладу. Автоматичний звуковий сигнал втрат слугує сигналом для зменшення робочої швидкості в загінці.

Виявлено, що підвищення продуктивності ЗК можливе за рахунок підвищення ефективного використання пропускної здатності МСП і підвищення завантаження двигуна на 20–30 % і тим самим зменшення питомої витрати палива на тонну і гектар в межах допустимих втрат зерна.

Ключові слова: зернозбиральний комбайн, продуктивність, ефективність, конструкційні характеристики, технічні фактори, технологічні фактори, завантаження двигуна, пропускна здатність, втрати зерна, витрата палива.

Постановка проблеми. Виробництво зерна в Україні та його валовий збір у сучасних умовах зростає. Приміром, у 2012–2017 рр. він зріс з 40 до 60 млн тонн зерна. Поряд з цим необхідно відмітити, що показники успіху супроводжуються таким негативним явищем, як втрати вирощених урожаїв, які сягають 7–8 млн тонн, а це складає 16–18 % від валового збору. Панівною причиною таких значних втрат урожаю є постійна нестача ЗК, низька технічна готовність і невідповідність персоналу застосовувати сучасну техніку. Відомо, що в агротерміни збирають лише 30 % посівів зернових культур, а тривалість збирального сезону перевищує їх у 3–5 разів.

Навантаження на один фізичний ЗК складає 189 га, на технічно справний – приблизно 218 га або 770 т. Понад 70 % комбайнів мають термін експлуатації до 30 років з ймовірним значенням коефіцієнта готовності 0,4–0,7, які намолочують 200–600 т; втрати від біологічного осипання досягають мінімум 10 % від валового збору. Причинами значних втрат вирощеного урожаю є високе фізичне навантаження на комбайн і низька ефективність використання наявного парку за потужністю двигуна та пропускною здатністю молотарки, агробіологічним станом хлібної маси, втратами зерна за молотаркою та ін.

В умовах реального виробництва потужність двигунів ЗК і пропускна здатність молотарки використовуються максимально до 57–63 % від номінального завантаження. Безумовно, низьке завантаження є основною причиною низької продуктивності, затягування термінів жнив і значних втрат зерна від біологічного осипання та перевитрат палива. Втрати вирощеного урожаю через осипання і низький відсоток збирання продовольчих класів зерна у встановлені агротерміни є причиною значних збитків (≈ 1 млрд \$). Ось чому тема є актуальною і має значну практичну цінність як для виробників ЗК, так і для їх користувачів, а також у підготовці інженерних кадрів сільськогосподарського виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведено аналіз літературних джерел, присвячених дослідженню науково-виробничих проблем, задач підвищення ефективності використання зернозбиральних комбайнів. Виявлено, що в більшості опублікованих робіт розглядається класичний набір організаційних, технічних, технологічних задач.

У результаті аналізу літературних джерел [1-5] визначено, що поза увагою і ретельним аналізом науковців залишається дослідження залежності ефективності використання ЗК від їх надійності, агробіологічного стану хлібної маси і числових значень механічних втрат за МСП. Не знайшло належного розгляду в опублікованих науково-прикладних роботах питання

впливу окремих технічних і технологічних факторів на ефективність використання зернозбиральних комбайнів. Розглянуто класифікації ЗК і встановлено, що однією із найбільш розповсюджених є класифікація Асоціації виробників продукції. Згідно з цією класифікацією комбайни поділено на V–IX класів залежно від мінімальної і максимальної потужності. З вищенаведеного випливає формулювання завдань досліджень.

Мета досліджень – підвищення техніко-технологічної ефективності використання ЗК через раціоналізацію завантаження двигуна та МСП у межах нормативних втрат зерна.

Виклад основного матеріалу досліджень. Ефективність використання ЗК залежно від недостатнього дослідження факторів можна описати функціонально залежністю:

$$U_{\Sigma} = f(q, \%Ne, (\Delta U + \Delta(\Delta U)), \%U), \quad (1)$$

де q – експлуатаційна пропускна здатність МСП ЗК, кг/с; $\%Ne$ – експлуатаційна потужність двигуна, кВт; $\Delta U + \Delta(\Delta U)$ – нерівномірність і флуктуація урожайності від середнього значення, кг/м²; $\%U$ – числові і відносні значення втрат зерна (%) МСП залежно від пропускної здатності, кг/с.

В останні роки виробники зернозбиральних комбайнів у технічній документації не наводять числових значень показників пропускної здатності, які входять у формули для визначення продуктивності, прогножуючи темпи жнив або вибираючи комбайн. Рішення знайдено порівнянням формул продуктивності (40 ц/га) з двох рівнянь, в одне з яких входить потужність двигуна, а в друге – пропускна здатність. За таких умов експлуатаційний показник пропускної здатності МСП ЗК визначається із залежності:

$$q_n = \frac{0,1 \cdot Ne \cdot \xi}{0,1 B_p \cdot U (1 + \delta_c) (N_M + N_{II}) + \frac{g \cdot f \cdot G_T}{\eta_{TP}}} + 0,2, \quad (2)$$

де Ne – ефективна потужність двигуна, кВт; ξ – коефіцієнт завантаження двигуна; B_p – робоча ширина захвату жатки, м; U – урожайність, т/га; δ_c – показник соломистості хлібної маси; N_M – питома потужність на обмолот, кВт×с/кг; N_{II} – питома потужність на подрібнення соломистої маси, кВт×с/кг; g – прискорення земного тяжіння, м/с²; f – коефіцієнт перекочування; G_T – маса комбайна, т; η_{TP} – ККД трансмісії.

У залежність (2) входять: п'ять технологічних та три технічні показники і три коефіцієнти, що дозволяє визначити з допустимою точністю

експлуатаційний показник пропускної здатності для ЗК різного технічного стану і технологічних характеристик хлібостою.

Для визначення швидкості ЗК в загінці з урахуванням динаміки руху із зміною потужності запропонована залежність:

$$N_{pyu} = [G_{mk} \cdot f_0 \cdot (1 + \rho(V_p - V_0))] \cdot \frac{V_p}{3,6}, \quad (3)$$

де G_{mk} – маса комбайнового агрегата, т; f_0 – коефіцієнт перекочування; ρ – коефіцієнт узгодження розмірності; V_p, V_0 – робоча і початкова швидкість, км/год.

Значення залишкової потужності двигуна визначимо за формулою:

$$N_3 = N_e - N_M - V_p^2 \cdot A_1 + V_p \cdot A_2, \quad (4)$$

$$\text{де } A_1 = \frac{10 \cdot G_{mk} \cdot f_0 \cdot \rho}{36 \cdot \eta_{mp}};$$

$$A_2 = \frac{10 \cdot G_{mk} \cdot f_0 \cdot (1 - \rho \cdot V_0) + B_p \cdot U \cdot (1 + \delta_c) \cdot N_{nm} \cdot \eta_{mp}}{36 \cdot \eta_{mp}}; N_M - \text{потужність,}$$

споживана на обмолот хлібної маси, а для зношеного і невідрегульованого двигуна із залежності:

$$N_3 = N_e - N_M - \Delta N_{\Pi} - V_p^2 \cdot A_1 + V_p \cdot A_2, \quad (5)$$

де ΔN_{Π} – зниження потужності двигуна внаслідок зношування і розрегульованості.

Остаточне рівняння (5) має вигляд:

$$V_p^2 \cdot A_1 + V_p \cdot A_2 - (N_e - N_m - N_3) = 0. \quad (6)$$

Визначимо значення V_p із залежності (6):

$$V_p = \frac{-A_2 \pm \sqrt{A_2^2 + 4A_1(N_e - N_m - \Delta N_{\Pi})}}{2 \cdot A_1}. \quad (7)$$

Вплив фактичної потужності двигуна ЗК V класу на швидкість руху показано на рисунку 1.

Проведений аналіз показує доцільність врахування імовірного зниження потужності двигуна зі збільшенням наробітку для прогнозування темпів жнив. Технологічна характеристика – нерівномірність і флуктуація урожайності ($U(1 + \delta_c) = U_{cp}$) по площі поля суттєво впливає на ефективність використання ЗК через ступінь завантаження МСП і на зміну механічних втрат. Флуктуаційна складова може накладатися на гармонічну нерівномірність (\pm) тривалістю 1–15 с. Визначено, що гармонічна складова

нерівномірності (ΔU_{cp}) може досягти до 35 % від середнього значення урожайності U_{cp} , а флуктуаційна складова – $(\Delta(\Delta U_{cp})) \pm 10\%$ від нерівномірності ΔU_{cp} . Для аналізу прийнято $u_{cp} \approx 1,3$ кг/м² хлібостою. Із урахуванням наведених вище факторів урожайність по полю визначається залежністю з використанням випадкових функцій:

$$U_{XM} = U_{CP} \pm \Delta U_{CP} \pm \Delta(\Delta U_{CP}), \text{ кг/м}^2, \quad (8)$$

де U_{cp} – середня урожайність, кг/м²; ΔU_{CP} – нерівномірність від середньої урожайності, кг/м²; $\Delta(\Delta U_{CP})$ – флуктуаційна складова від нерівномірності, кг/м².

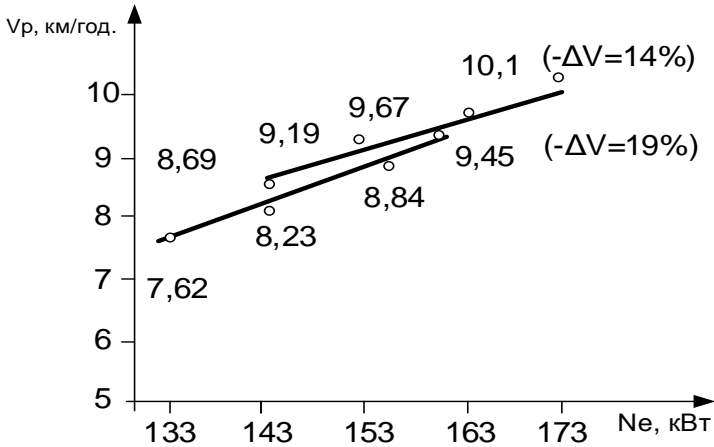


Рисунок 1 – Закономірності зміни швидкості руху ЗК V класу від зниження потужності двигуна

Отримано залежність для розрахунку нерівномірності урожайності по полю:

$$\Delta U_{CP} = \pm U_{cp} \sin\left(\frac{n_1 x_1}{\lambda_{xM1}}\right), \quad (9)$$

де n_1 – число повних коливань; $x_1 = V(t_1) \cdot t_1$ – довжина хвилі нерівномірності урожайності; λ_{xM1} – період коливання урожайності, м(с); U_{cp} – маса урожаю, кг/м².

Флуктуаційна складова від нерівномірності урожайності описується залежністю:

$$\Delta(\Delta U_{cp}) = \pm U_{cp} \cdot \text{Sin}\left(\frac{n_2 \cdot x_2}{\lambda_{x_{m2}}}\right), \quad (10)$$

де $n_2 \ll n_1$; $\lambda_{x_{m2}} \ll \lambda_{x_{m1}}$; $x^2 \ll x^1$; $t_2 \ll t_1$; $x_2 = V(t_2) \cdot t_2$ – довжина хвилі флукуації урожайності.

З урахуванням гармонічної нерівномірності і флукуаційної складової урожайності рівняння для визначення фактичної пропускної здатності можна записати у вигляді:

$$q_{\phi} = \frac{0,1Ne\xi}{0,1 \cdot B \cdot \left[Z_1 \cdot \text{Sin}\left(\frac{n_1 \cdot x_1}{\lambda_1}\right)(N_m + N_n) + Z_2 \cdot \text{Sin}\left(\frac{n_2 \cdot x_2}{\lambda_2}\right)(N_m + N_n) \right] + \frac{g \cdot f \cdot G_k}{\eta}} + 0,2, \quad \text{кг/с}$$

$$B \cdot \left(Z_1 \cdot \text{Sin}\left(\frac{n_1 \cdot x_1}{\lambda_1}\right) + Z_2 \cdot \text{Sin}\left(\frac{n_2 \cdot x_2}{\lambda_2}\right) \right)$$

де $Z_1 = U_{cp} \pm (0,25U_{cp} \pm 0,025U_{cp}^{-2})$;

$Z_2 = \Delta U_{cp} \pm (0,125\Delta U_{cp} \pm 0,01\Delta U_{cp}^{-2})$; η – ККД трансмісії; f – коефіцієнт перекочування; g – прискорення земного тяжіння, м/с².

Графічну інтерпретацію зміни врожайності по площі поля залежно від агротехнологічних факторів показано на рисунку 2: ΔU – нерівномірність урожайності; $\Delta(\Delta U_{cp})$ – флукуація урожайності; $\lambda_{x_{m1}}, \lambda_{x_{m2}}$ – період коливань нерівномірності і флукуації.

Гармонічна нерівномірність і флукуаційні складові є причиною зміни відповідно завантаження МСП і двигуна (при цьому приймаємо параметри, характерні для лісостепової зони, при $\Delta U_{\max} - 35\%$, $\Delta U_{cp} \approx 25\%$ флукуація $\Delta(\Delta U_{cp}) \approx 10\%$ від ΔU_{cp}).

Друга технологічна характеристика зернозбиральних комбайнів – механічні втрати зерна за МСП. Встановлено, що відносні значення втрати зерна за МСП в межах до 0,5–0,6 % не обмежують продуктивність.

Зі збільшенням продуктивності ЗК через підвищення пропускної здатності відносні значення втрат зерна різко збільшуються – від 0,5–0,6 до 1,5 %, що суттєво обмежує подальше підвищення продуктивності. Рівняння відносних втрат від пропускної здатності описується залежністю:

$$y = \frac{y_{cp} \cdot \exp(ky_{cp} \cdot q)}{\exp(ky_{cp} \cdot q) + 10y_{cp} - 1}, \quad \% \quad (11)$$

де y_{cp} – граничне значення втрат, %; k – коефіцієнт самоосипання, %, 0,125; 0,250; 0,5; q – пропускна здатність, кг/с; y – поточне значення втрат, %.

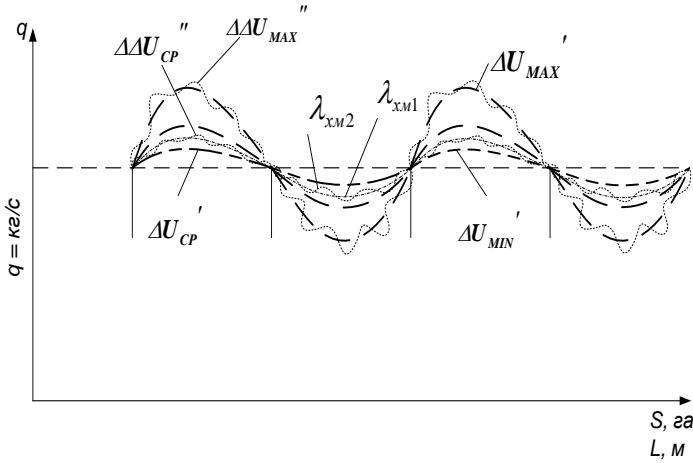


Рисунок 2 – Графічна інтерпретація зміни врожайності, пропускної здатності і моменту опору барабана від середнього значення впливу агротехнологічних факторів

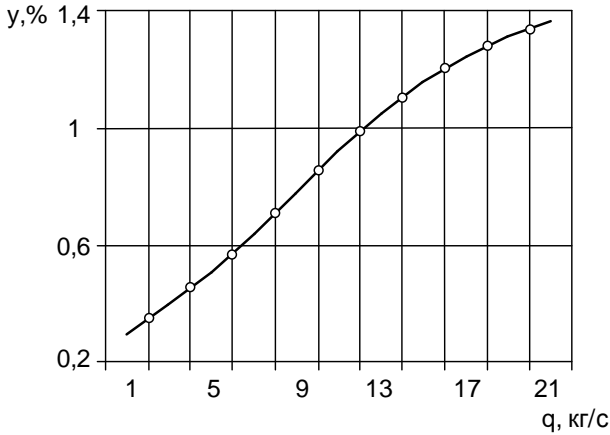


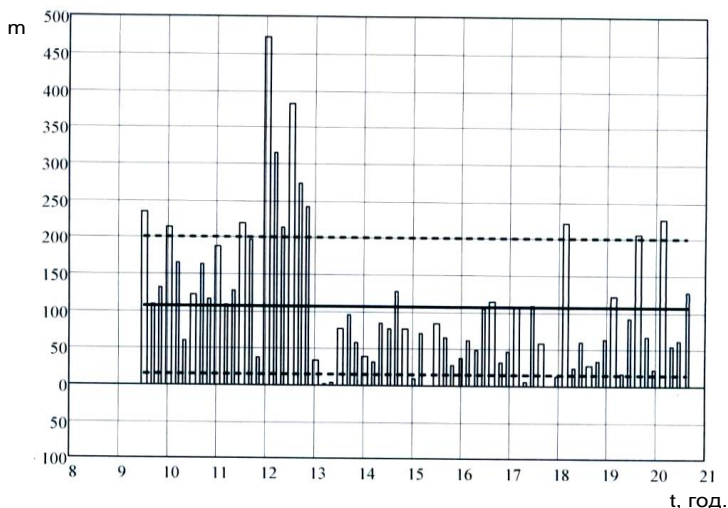
Рисунок 3 – Залежність механічних втрат зерна від пропускної здатності ЗК

Графічна залежність після розв'язку рівняння (12), яка показана на рисунку 3, не підтверджує зміну механічних втрат зерна залежно від підвищення завантаження молотарки і нагадує S-подібну криву, яку передбачав академік В. П. Горячкін. Точка перегину для функції показує величину завантаження, за якого втрати починають зменшуватися. Закономірність зміни втрат матиме вираз (12). Точка перегину функції, за

якої втрати починають зменшуватися, значною мірою залежить від прийнятого значення k – коефіцієнта самоосипання:

$$q_n = \frac{\ln(10y_{зр.} - 1)}{ky_{зр.}}, \text{ кг/с.} \quad (12)$$

Виробничі дослідження ефективності використання зернозбиральних комбайнів через контроль і облік механічних втрат зерна за молотильно-сепарувальним пристроєм дозволили виявити, що під час жнив комбайн № 1 відпрацював $t_3=103,51$ год, термін чистої роботи склав $t_4=94,8$ год, зібрано – 483 т; коефіцієнт використання часу зміни $K_t=0,91$. Комбайн № 2 відпрацював $t_2= 58,08$ год, $t_4= 52,8$ год., $K_t=0,97$, зібрано – 374 т. Комбайн № 3 на збиранні зернової групи відпрацював 77,15 год, зібрано 304 т. На рисунку 4. у вигляді гістограм показані втрати зерен за кожні 10 хв протягом зміни.



Рисунку 4 – Гістограми розподілу середніх значень сумарної кількості втрат (m) зерна за кожні 10 хв роботи за соломотрясом і решітним станом з коефіцієнтом варіації 0,8

Дослідження в умовах виробничої експлуатації дозволили визначити, що фактичні втрати зерна за термін жнив у відносному значенні за допустимих 1,5 % від валового збору склали $\Delta u = 0,03$ %. У числовому виразі за термін жнив зафіксовано втрати зерна за масою $\Delta m = 2,225$ кг (допустимі 7236 кг); питома витрата палива $\Delta G_t=4,8$ л/т; $\Delta G_{га}=26$ л/га; продуктивність $U \approx 7$ т/год; $W_p \approx 1$ га/год; $V_p = 1,726$ км/год. Подібна

залежність експлуатаційних показників спостерігається за ЗК № 2 (m_c – кількість зерен/м², K_{vc} – коефіцієнт варіації). Зібрано за шість змін ($t_p = 52,58$ год.) 374,22 т.

На нерівномірність і флуктуаційні складові урожайності впливає багато агробіологічних факторів: нерівномірність внесення добрив (min=10–33 %, max=59–95 %), якість основного обробітку ґрунту перед сівбою (до 30 %), рельєф і мікрорельєф поля (до 30 %), виживання рослин залежно від погоднокліматичних умов (від 81 до 49 %), якість підживлення (до 25 %), захист рослин (до 20 %). Із наведених числових значень втрат зерна по інтервалах обліку (рис. 6) явно простежується їх хвилеподібна зміна з різницею від min до max в 3–4 рази збільшення по висоті і амплітуді, яку наближено можна розглядати як синусоподібну залежність.

Висновки.

1. Визначено вплив зниження потужності двигунів у випадку зношування і розрегульованості ЗК на їхню продуктивність. Теоретично доведено, що зі зниженням ефективної потужності двигуна на 14 % робоча швидкість ЗК в загінці зменшується на 16 % за лінійною залежністю. Враховуючи те, що можливість вибору оптимальної робочої швидкості в загінці зменшується, то знижується і продуктивність ЗК.

2. Методом інтегральної оцінки визначено значення експлуатаційного показника пропускної здатності МСП, за якої розрахункова продуктивність ЗК із заданою потужністю двигуна і пропускною здатністю МСП – рівнозначні. Визначено раціональний показник пропускної здатності ЗК. Із загальним зниженням потужності двигуна до 17 %, ККД гідросистем, пасових і ланцюгових передач, механічних систем і механізмів до 10 % пропускна здатність МСП зменшується на 28 %.

3. Теоретично обґрунтовано, що нерівномірність (до +/-35%) і флуктуація (+/-10%) урожайності по площі поля впливають на пропускну здатність МСП. Зміна величини пропускної здатності МСП приводить до зміни значень зернових втрат за МСП. Встановлено, що для збільшення пропускної здатності ЗК за умови підвищення завантаження МСП механічні втрати зерна зростають за S-подібною залежністю. Вказане слугує однією з причин строкатості і варіації значень втрат за інтервалами обліку.

Література

1. Войтюк В. Д. Визначення впливу використання зернозбиральних комбайнів на їх експлуатаційні показники / В. Д. Войтюк, А. А. Демко, О. А. Демко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – 2009. – Вип. 134. – Ч. 2. – С. 131–138.

2. Демко О. А. Вплив кваліфікації операторів на ефективність використання машин / О. А. Демко // Науковий вісник Національного

університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – 2009. – Вип. 134. – Ч. 2. – С. 159–169.

3. Демко О. А. Аналіз чинників, що визначають технічний стан комбайнів / О. А. Демко, А. А. Демко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – 2010. – Вип. 144. – Ч. 2. – С. 81–91.

4. Дубровін В. О. Метод визначення технічного рівня сучасних зернозбиральних комбайнів з урахуванням експлуатаційних і конструктивних характеристик / [В. О. Дубровін, А. А. Демко, О. В. Надточій, О. А. Демко] // Техніка і технології АПК. – 2011. – № 11 (26). – С. 32–36.

5. Демко О. А. Дослідження залежності продуктивності ЗК від механічних втрат зерна за молотильно-сепаруючим пристроєм (МСП) комбайнів / О. А. Демко, О. В. Надточій, Р. Я. Якимів // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки та технологій для сільського господарства України. – 2014. – Вип. 18 (32). – Кн. 1. – С. 165–177.

***Аннотація.** Стаття посвячена вопросам повышения производительности зерноуборочного комбайна (далее – ЗК) за счет эффективного использования технических и технологических факторов с контролем механических потерь зерна за молотильно-сепарирующим устройством (далее – МСУ).*

Анализ опубликованных работ позволил выявить, что вне внимания ученых остались исследование эффективности использования технических характеристик заложённых в конструкции ЗК, в частности загрузки двигателя, пропускной способности МСУ и энергетических показателей: удельного расхода мощности на обмолот, затраты топлива на одну тонну и один га, механических потерь зерна за комбайном. Теоретические исследования позволили выявить влияние технических и технологических факторов, (пестроты урожайности, агробиологическое состояния хлебной массы) на пропускную способность и, соответственно, на производительность и на их производную – потери зерна на МСУ ЗК.

Аналитически определена зависимость скорости движения комбайна в загончики от загрузки и мощность двигателя. Разработан интегральный метод определения пропускной способности МСУ, исследовано влияние неравномерности и флуктуации урожайности по площади поля на пропускную способность МСУ и изменение крутящего момента на валу барабана. Зависимость производительности ЗК из-за пропускной способности от относительных механических потерь по МСУ ЗК. Впервые исследованы роль и значимость механических потерь зерна за МСУ при определении эффективности использования ЗК. Определено, что числовые значения механических потерь по сменам меняются в зависимости от агробиологических характеристик хлебостоя. Средние значения числовых потерь характеризуется коэффициентом вариации в пределах $K_v=0.3-0.8$ и максимальные выбросы верхних значений попадают в красную зону прибора

и автоматический звуковой сигнал потерь и служит сигналом для уменьшения рабочей скорости в загонщики.

Выявлено, что повышение производительности ЗК возможно за счет повышения эффективного использования пропускной способности МСУ и повышение загрузки двигателя на 20-30 % и тем самым уменьшение удельного расхода топлива на тонну и гектар в пределах допустимых потерь зерна.

***Summary.** The thesis is dedicated to improving combine harvesters productivity by means of efficient utilization of technical and technology factors with control of grain losses behind threshing and separation unit.*

Published papers analysis revealed that scientists left out of sight research of efficient utilization of technical features inherited in the combine harvesters design, including engine load, threshing through output capacity and energy performance factors: specific threshing power consumption, fuel consumption per one tone of grain and one hectare harvested, mechanical grain losses behind the combine harvester. Theoretical research allowed to determine influence of technical and technological factors (uneven yield spread, agronomy condition of cereals plants) on threshing output and, respectively, on performance and its derivative – grain losses behind threshing and separation.

Dependence of combine harvester working speed and threshing load and engine load was analytically determined. Integral method for defining threshing output was developed, influence of yield fluctuations across the field area on threshing output and engine torque change was researched as well as dependence of specific mechanical grain losses behind threshing and separation from combine harvester output. For the first time role and importance of mechanical grain losses behind threshing and separation when determining combine harvester efficiency. Established that numerical mechanical losses values change depending of agronomic characteristics of grain mass. Medium numerical mechanical losses values can be described by variation coefficient within $K_v=0.3-0.8$ and when maximum values are reached working speed must be reduced.

Established that combine harvester efficiency improvement staying within permitted grain losses parameters is possible by increasing threshing output and increasing engine load by 20–30 %, at the same time reducing specific fuel consumption per harvested tone and hectare.