

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ І  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І  
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

УДК 621.311

О.П. КАРПОВА

Державний вищий навчальний заклад «Мелітопольський промислово-економічний коледж»

М.В. ПОСТНІКОВА

Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь

**ЕНЕРГОЄМНІСТЬ ЯК КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА**

*У даній роботі розглянута енергоємність як критерій оптимізації технологічного процесу очищення зерна, тому що вона є найбільш інформативним показником для визначення енергозберігаючих режимів роботи. Результати теоретичних і експериментальних досліджень енергоємності технологічних процесів очищення зерна відрізняються в середньому не більше ніж на 2 %. Вони показали можливість обґрунтування та розробки науково-обґрунтованих норм електроспоживання, тому що найбільш діючим важелем проведення енергозберігаючої політики, регульованої законодавством, є встановлення нормативів витрати електроенергії і стандартів енергоефективності, недотримання яких спричиняє, найчастіше, фінансову відповідальність. При дослідженні впливу енергетичних факторів на енергоємність технологічних процесів очищення зерна було проведено багатофакторний експеримент. Це дозволило оцінити вплив того або іншого фактора на енергоємність процесу очищення зерна. Натурні експерименти підтвердили адекватність математичних моделей у вигляді рівнянь регресії і ефективність використаного методу багатофакторного експерименту.*

*Ключові слова: енергозбереження, енергоємність, раціональне використання електроенергії, електропривод, нормування електроенергії, багатофакторний експеримент.*

А.П. КАРПОВА

Государственное высшее учебное заведение «Мелитопольский промышленно-экономический колледж»

М.В. ПОСТНИКОВА

Таврический государственный агротехнологический университет, г. Мелитополь

**ЭНЕРГОЁМКОСТЬ КАК КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ЗЕРНА**

*В данной работе рассмотрена энергоёмкость как критерий оптимизации технологического процесса очистки зерна, т.к. она является наиболее информативным показателем для определения энергосберегающих режимов работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований энергоёмкости технологических процессов очистки зерна отличаются в среднем не более чем на 2 %. Они показали возможность обоснования и разработки научно-обоснованных норм электропотребления, так как наиболее действенным рычагом проведения энергосберегающей политики, регулируемой законодательством, является установление нормативов расхода электроэнергии и стандартов энергоэффективности, несоблюдение которых влечёт за собой, чаще всего, финансовую ответственность. При исследовании влияния энергетических факторов на энергоёмкость технологических процессов очистки зерна был проведен многофакторный эксперимент. Это позволило оценить влияние того или иного фактора на энергоёмкость процесса очистки зерна. Натурные эксперименты подтвердили адекватность математических моделей в виде уравнений регрессии и эффективность использованного метода многофакторного эксперимента.*

*Ключевые слова: энергосбережение, энергоёмкость, рациональное использование электроэнергии, электропривод, нормирование электроэнергии, многофакторный эксперимент.*

O.P. KARPOVA

State higher educational establishment «Melitopol college of industry and economics»

M.V. POSTNIKOVA

Tavria State Agrotechnological University, Melitopol

**THE ENERGY INTENSITY AS THE OPTIMIZATION CRITERION  
OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF CLEANING GRAIN**

*In this work, energy intensity is considered as a criterion for optimizing the technological process of grain cleaning, because it is the most informative indicator for determining energy-saving operating models. The results of theoretical and experimental studies of the energy intensity of technological processes of purification of the grain differ on average of no more than 2 %. They showed the possibility of justification and development of scientifically grounded norms of power consumption, as the most effective tool for implementing energy-saving policies regulated by legislation is the establishment of power consumption standards and energy efficiency standards, the violation of which entails, most of all, financial responsibility. When studying the influence of energy factors on the energy intensity of technological processes of cleaning grain, a multifactor experiment was carried out. It allowed us to assess the influence of a factor on the energy intensity of the grain cleaning process. Field experiments have confirmed the adequacy of mathematical models in the form of regression equations and the efficiency of the used method of multifactor experiment.*

*Keywords: energy saving, energy intensity, rational use of electric power, electric drive, electricity regulation, multifactor experiment.*

**Постановка проблеми**

Проблема енергозбереження в електроприводах технологічного обладнання особливо гостро постає останнім часом у зв'язку з подорожчанням енергоносіїв в Україні. Відомо, що 60-70 % спожитої електроенергії в промисловості і сільському господарстві припадає на електропривод технологічних машин і обладнання. Тому раціональне використання електроенергії на зернопунктах, оснащених енергоємним технологічним обладнанням, особливо актуально [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Ефективність використання електроенергії завжди знаходилася в центрі уваги дослідників [1-4]. Однак, досліджень по цьому питанню проводилось недостатньо.

Найважливішим висновком, зробленим на основі аналізу стану питання, є наступний: як основний критерій в оцінці ефективності перетворення енергії на різних етапах, доцільно використовувати енергоємність [4].

Енергоємність є основою для розробки науково-обґрунтованих норм питомої витрати електроенергії для технологічних схем зерноочисних агрегатів [7-13]. Аналіз закордонного досвіду показує, що реальні досягнення в підвищенні енергоефективності можливі тільки при створенні необхідних законодавчих умов, першочерговими з яких є нормування питомих витрат, контроль енерговикористання та економічного стимулювання енергоспоживачів.

**Формулювання мети дослідження**

Дослідження енергоємності технологічних процесів очищення зерна.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Питомі витрати електроенергії на виконання технологічних операцій очищення зерна на зернопунктах залежать від багатьох технологічних, технічних та суб'єктивних факторів [2-4]. Більшість з цих факторів є змінними і мають тісний зв'язок між собою. Як правило, зміна одного з них визиває зміну інших.

Деякі фактори, які впливають на витрати електроенергії, мають конкретні кількісні значення. До них відносяться: фізико-хімічні, технологічні, енергетичні фактори. Деякі з них не піддаються кількісній оцінці, наприклад, кваліфікація оператора, різні відхилення від виконання технологічних операцій.

Залежності між витратами електроенергії і факторами мають випадковий характер внаслідок непостійності факторів, їх взаємного впливу і дії неврахованих факторів і можуть бути представлені у вигляді функції

$$W(t) = f(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_k), \quad (1)$$

де  $x_1, x_2, \dots, x_k$  – фактори, які впливають на електроспоживання.

Для визначення спільного впливу різних факторів на електроспоживання доцільно провести багатофакторний експеримент [5, 6]. Проведено дослідження впливу енергетичних факторів на енергоємність технологічних процесів очищення зерна. До енергетичних факторів відносяться: електроозброєність, ступінь завантаження електродвигунів, якість енергопостачання (напруга на затискачах електро-двигунів та частота струму) [4].

Дослідження проводилися на зерноочисних агрегатах ЗАВ-20, ЗАР-5, так як ці агрегати є базовими агрегатами. Незалежно від початку впровадження нових агрегатів і комплексів ще багато років основна маса зерна буде очищатися на обладнанні, яке мають господарства, тому необхідно прийняти ряд додаткових заходів по його реконструкції для того, щоб забезпечити працездатність старого обладнання при мінімальних питомих витратах електроенергії.

На структурній схемі математичної моделі питомих витрат електроенергії електродвигунів зерноочисного агрегату показаний вибір змінних енергетичних факторів, які впливають на питомі витрати електроенергії (рис. 1).

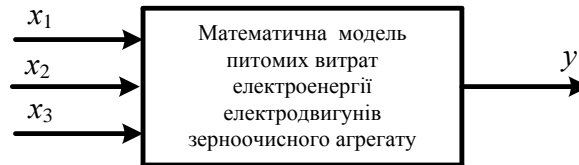


Рис. 1. Структурна схема математичного моделювання

В математичній моделі (рис. 1) прийнято:

$x_1$  – електрооброєність, кВт·год./люд.;

$x_2$  – коефіцієнт завантаження електродвигунів, в.о.;

$x_3$  – коефіцієнт якості електропостачання, в.о.;

$y$  – питомі витрати електроенергії, кВт·год./т.

Вибір факторів, інтервалів варіювання, рівнів визначався на основі аналізу апріорної інформації та попередніх експериментів [3, 4]. Попередні експерименти були проведені за основною методикою експериментальних досліджень з використанням методу випадкового балансу [5, 6]. Експерименти були поставлені по певному плану, були виділені значущі фактори. Проводився повний факторний експеримент (ПФЕ) типу  $2^3$ . Це дозволило оцінити вплив того чи іншого фактора на енергоємність процесу очищення зерна при багатофакторному впливі. Статистична обробка даних експерименту проводилась відповідно до методики, яка описана в [5, 6].

Рівні факторів і інтервали варіювання для зерноочисних агрегатів ЗАВ-20 та ЗАР-5 наведені в таблицях 1 і 3, а матриці плану повного факторного експерименту (ПФЕ) типу  $2^3$  в табл. 2 і 4.

Таблиця 1

Рівні факторів і інтервали варіювання для ЗАВ-20

Рівні факторів	Нормована величина	$x_1$ , кВт·год./люд.		$x_2$		$x_3$	
		ячмінь	пшениця	ячмінь	пшениця	ячмінь	пшениця
Верхній рівень	+1	11,0	15,0	0,8	0,8	1,0	1,0
Основний рівень	0	8,5	12,5	0,6	0,6	0,95	0,95
Нижній рівень	-1	6,0	10,0	0,4	0,4	0,90	0,90
Шаг варіювання		±2,5	±2,5	±0,2	±0,2	±0,05	±0,05

Таблиця 2

Матриця плану ПФЕ типа  $2^3$  і результати експерименту (ЗАВ-20 – пшениця)

N	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$\bar{y}$	$\tilde{y}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	1,620	1,5819
2	+	+	-	-	-	-	+	+	2,960	2,9631
3	+	-	+	-	-	+	-	+	1,115	1,1007
4	+	+	+	-	+	-	-	-	2,510	2,4819
5	+	-	-	+	+	-	-	+	1,560	1,5819
6	+	+	-	+	-	+	-	-	2,950	2,9631
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1,070	1,1007
8	+	+	+	+	+	+	+	+	2,470	2,4819
$b_i$	2,0319	0,6906	-0,2406	-0,0194	0,0081	0,0069	-0,002	-0,0056		

$$S_B^2 \{y\} = 0,002206 \quad S^2 \{b_i\} = 0,000138 \quad S_{aa}^2 \{y\} = 0,001676$$

Таблиця 3

**Рівні факторів і інтервали варіювання для ЗАР-5**

Рівні факторів	Нормована величина	x <sub>1</sub> , кВт·год./люд.			x <sub>2</sub>			x <sub>3</sub>		
		ячмінь	пшениця я	рис	ячмінь	пшениця я	рис	ячмінь	пшениця я	рис
Верхній рівень	+1	11,0	22,0	11,0	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0
Основний рівень	0	8,5	14,5	9,0	0,6	0,6	0,6	0,95	0,95	0,95
Нижній рівень	-1	6,0	7,0	7,0	0,4	0,4	0,4	0,90	0,90	0,90
Шаг варіювання		±2,5	±7,5	±2,0	±0,2	±0,2	±0,2	±0,05	±0,05	±0,05

Таблиця 4

**Матриця плану ПФЕ типу 2<sup>3</sup> і результати експерименту (ЗАР-5 – пшениця)**

N	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	$\bar{y}$	$\tilde{y}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	2,00	1,944
2	+	+	-	-	-	-	+	+	4,19	4,166
3	+	-	+	-	-	+	-	+	1,48	1,436
4	+	+	+	-	+	-	-	-	3,68	3,658
5	+	-	-	+	+	-	-	+	1,88	1,944
6	+	+	-	+	-	+	-	-	4,15	4,166
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1,40	1,436
8	+	+	+	+	+	+	+	+	3,63	3,658
b <sub>i</sub>	2,801	1,111	-0,254	-0,0362	-0,0037	0,0137	0,0037	0,0062		

$$S_B^2 \{y\} = 0,0127 \quad S^2 \{b_i\} = 0,0008 \quad S_{aa}^2 \{y\} = 0,00504$$

В результаті розрахунків отримані рівняння регресії для розрахунку питомих витрат електроенергії в залежності від енергетичних факторів (2-6).

ЗАВ-20

$$\text{ячмінь} \quad \tilde{y} = 3,06 + 1,033 \delta_1 - 0,25 \delta_2 ; \quad (2)$$

$$\text{пшениця} \quad \tilde{y} = 2,0319 + 0,6906 \delta_1 - 0,2406 \delta_2 ; \quad (3)$$

ЗАР-5

$$\text{ячмінь} \quad \tilde{y} = 3,098 + 1,073 \delta_1 - 0,244 \delta_2 ; \quad (4)$$

$$\text{пшениця} \quad \tilde{y} = 2,801 + 1,111 \delta_1 - 0,254 \delta_2 ; \quad (5)$$

$$\text{рис} \quad \tilde{y} = 3,713 + 1,441 \delta_1 - 0,241 \delta_2 ; \quad (6)$$

Аналіз рівнянь регресії (2-6) показує, що вплив енергетичних факторів на питомі витрати електроенергії різний: збільшення електроозброєності збільшує значення вихідної величини, а збільшення коефіцієнта завантаження зменшує значення вихідної величини.

Проведені дослідження явилися основою для розробки науково-обґрунтованих норм питомої витрати електроенергії (табл. 5) для технологічних схем очистки зерна на агрегатах ЗАВ-20 та ЗАР-5 [7-10], які були обговорені та схвалені на технічній раді Запорізького обласного, Мелітопольського районного управління сільського господарства та Великопетиського районного управління сільського господарства Херсонської області.

Таблиця 5

Рекомендовані науково-обґрунтовані норми витрати електроенергії  
при очищенні зерна на потокових лініях зернопунктів

Тип потокової лінії	Технологічні схеми	Продуктивність, т/год.	Рекомендовані норми, кВт·год./т
ЗАВ-20	1 Одна лінія з трієром	7,5	2,475
	2 Одна лінія без трієра	10	1,726
	3 Дві лінії з трієрами	15	1,562
	4 Дві лінії без трієрів	20	1,069
ЗАР-5	1 Первинна - вторинна - трієр	20	1,432
	2 Первинна – вторинна (без БТ)	20	1,183
	3 Первинна – вторинна (без СВУ)	20	0,913
	4 Первинна очистка	20	0,658

Рекомендовані науково-обґрунтовані норми електроспоживання призначені для планово-економічних відділів обласних управлінь сільського господарства для планування і контролю витрати електроенергії на технологічні процеси дороблювання зерна на потокових лініях зернопунктів півдня України. Аналогічні дослідження проводяться для інших зерноочисних агрегатів, які випускає промисловість [11-13].

Нормування витрати електроенергії стає ефективним фактором енергозбереження лише за умови системного підходу при впровадженні норм:

- затвердження норм на відповідному рівні як офіційного нормативного документу;
- своєчасне сезонне або річне планування норм для зернопунктів і інших структур АПК;
- впровадження сучасних приладів обліку витрати електроенергії з класом точності 1,0, наприклад, електронних тритарифних лічильників Альфа, Енергія й ін.;
- введення системи економічного стимулювання при виконанні встановлених норм аж до введення пільгових податків;
- введення адміністративного впливу, матеріальних санкцій за невиконання норм і перевитрати електроенергії аж до збільшення податкових ставок.

**Висновки**

1. З енергетичних факторів найбільше впливає на енергоємність електрооборудування та коефіцієнт завантаження електродвигунів.

2. Отримані математичні залежності питомих витрат електроенергії від енергетичних факторів погоджуються з експериментальними даними і відрізняються в середньому не більше як на  $\pm 2\%$ .

3. Науково-обґрунтовані норми витрати електроенергії при очищенні зерна пшениці в залежності від технологічної схеми потокових ліній ЗАВ-20, ЗАР-5, що рекомендуються, наступні:

ЗАВ-20 – 2,475...1,069 кВт·год./т;

ЗАР-5 – 1,432...0,658 кВт·год./т.

**Список використаної літератури**

1. Корчемний М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань. – Тернопіль : Підручники і посібники, 2001. – 984 с.
2. Ястребов П.П. Использование и нормирование электроэнергии в процессах переработки и хранения хлебных культур / П.П. Ястребов. – М. : Колос, 1973. – 331 с.
3. Карпова А.П. Исследование влияния технических и технологических факторов на электропотребление при подработке зерна на юге УССР: автореф. дис... канд. техн. наук / А.П. Карпова. – К., 1981. – 21 с.
4. Постнікова М.В. Енергозберігаючі режими роботи електромеханічних систем обробки зерна на зернопунктах : автореф. дис... канд. техн. наук / М.В. Постнікова. – Мелітополь, 2011. – 22 с.
5. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
6. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко [и др.] – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
7. Мартиненко І.І. Обґрунтування норм витрати електроенергії на потокових лініях зернопунктів методом планування експерименту / І.І. Мартиненко, М.В. Постнікова // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник Харківського національного

- технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків, 2005. – Вип. 37, т.1. - С. 109-113.
8. Карпова А.П. Обоснование норм расхода электроэнергии на поточных линиях зернопунктов методом суммарных мощностей / А.П. Карпова, М.В. Постникова // Энергосберегающие технологии производства и переработки с.х. продукции: Сборник научных трудов Крымского агротехнологического университета. – Симферополь, 2006. – Вып. 93. - С. 60-64.
  9. Постнікова М.В. Розробка науково-обґрунтованих норм енергоємності при обробці зерна на зернопунктах / М.В. Постнікова // Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Тематичний збірник наукових праць. – Харків, 2008. - №30. – С. 511-512.
  10. Дидур В.А. Научное обоснование удельных расходов электроэнергии при очистке зерна методом математического планирования эксперимента / [В.А. Дидур, Е.П. Масюткин, М.В. Постникова, В.А. Масловский] // Праці інституту електродинаміки НАН України. – Київ, 2008. – Вип. 19. – С. 94-98.
  11. Постнікова М.В. Розрахунок мінімальних питомих витрат електроенергії на очищення посівного зерна на зернопунктах / М.В. Постнікова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 175 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Х.: ХНТУСГ, 2016. – Вип. 175. – С. 134 - 136.
  12. Карпова О.П. Експериментальні дослідження енергетики електроприводу машин зерноочисних агрегатів / О.П. Карпова, М.В. Постнікова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 11 т. 4. – С. 130-134.
  13. Карпова О.П. Експериментальне дослідження перетворення електричної енергії в електромеханічних системах обробки зерна / О.П. Карпова, С.В. Михайлов, М.В. Постнікова // Науковий вісник ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Вип. 2, т.1. – С. 169-173.