

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-енергетичний факультет
Кафедра агроінженерії**

**Енергоефективні та ресурсощадні технології переробних
і тваринницьких підприємств:**

методичні рекомендації для виконання практичних робіт
для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти ОПП
«Агроінженерія» спеціальності

Н7 «Агроінженерія» денної та заочної форм здобуття вищої освіти

Миколаїв
2026

УДК 620.91:631.371

E61

Рекомендовано до друку рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 22.09.26, протокол № 1.

Укладач:

О. А. Горбенко – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії, Миколаївський національний аграрний університет

Рецензенти:

О. С. Садовий – канд.техн. наук, доцент, завідувач кафедри агроінженерії, Миколаївський національний аграрний університет

С. М. Галімов – канд.с.г. наук, доцент, директор СГПП «Техмед-Юг»

© Миколаївський національний аграрний університет, 2026

© Горбенко О. А., 2026

ПЕРЕДМОВА

Методичні рекомендації призначені для організації та проведення практичних робіт з дисципліни «Енергоефективні та ресурсоощадні технології переробних і тваринницьких підприємств». Кожна практична робота містить мету роботи, стислі теоретичні відомості, основні розрахункові формули з поясненням позначень, приклад виконання розрахунку з числовими даними та варіанти завдань для самостійного виконання. Наприкінці кожної роботи наведено контрольні питання для самоперевірки та підготовки до захисту роботи. За результатами виконання практичної роботи студенту необхідно підготувати презентацію або проєкт, у якому представити результати проведених розрахунків та їх інженерний аналіз.

У роботі необхідно охарактеризувати досліджуваний технологічний процес, обладнання або виробничу систему; навести вихідні дані та методику виконання розрахунків; визначити основні показники енергоспоживання, енергоефективності та використання матеріальних ресурсів; проаналізувати отримані результати та встановити основні фактори, що впливають на ефективність технологічного процесу. На основі проведених розрахунків студент повинен запропонувати технічні або технологічні заходи щодо підвищення енергоефективності та ресурсоощадності, обґрунтувати їх доцільність і, за можливості, визначити очікуване зменшення енергетичних та матеріальних витрат.

Презентація або проєкт повинні містити розрахункові залежності, таблиці, графіки, діаграми, технологічні схеми та результати порівняння існуючого і запропонованого варіантів. Особливу увагу необхідно приділити практичній значущості отриманих результатів та можливості їх застосування у виробничих умовах. Під час захисту студент повинен пояснити методику розрахунку, обґрунтувати отримані результати, охарактеризувати запропоновані заходи та сформулювати висновки щодо підвищення ефективності використання енергетичних і матеріальних ресурсів.

ЗМІСТ

Практична робота № 1. Аналіз структури енергоспоживання переробних і тваринницьких підприємств	5
Практична робота № 2. Моделювання енергетичних процесів переробки сільськогосподарської продукції.....	6
Практична робота № 3. Системний аналіз енергоефективності виробничих процесів підприємства	7
Практична робота № 4. Класифікація енергоспоживчого обладнання переробних підприємств	8
Практична робота № 5. Побудова базової математичної моделі енергоспоживання процесу.....	9
Практична робота № 6. Аналіз впливу енергетичних параметрів на ефективність процесу	10
Практична робота № 7. Оцінювання показників енергоефективності виробництва продукції	11
Практична робота № 8. Оптимізація енергоспоживання технологічного процесу переробки.....	12
Практична робота № 9. Аналіз надійності енергоощадних технологічних систем та обладнання.....	13
Практична робота № 10. Розробка системи енергетичного аудиту технологічного процесу.....	14
Практична робота № 11. Розробка інженерного рішення з підвищення енергоефективності виробничої системи	15
Практична робота № 12. Проєктування енергоощадного обладнання переробних підприємств	16
Практична робота № 13. Розрахунок енергетичного балансу технологічного обладнання	17
Практична робота № 14. Аналіз експлуатаційних даних для підвищення енергоефективності обладнання	18
Практична робота № 15. Обґрунтування використання відновлюваних джерел енергії на підприємстві	19

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

Аналіз структури енергоспоживання переробних і тваринницьких підприємств

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою аналізу енергоспоживання підприємства: обчислення сумарних витрат енергії, енергоемності виробництва, коефіцієнтів завантаження та використання потужності обладнання, а також потенціалу енергозбереження.

Теоретичні відомості

Аналіз енергоспоживання підприємства здійснюється на рівнях агрегату, лінії, цеху та підприємства в цілому за видами енергоносіїв (електроенергія, паливо, теплота). Комплексна оцінка поєднує узагальнений показник енергоефективності, енергоемність виробництва, показники завантаження обладнання та потенціал енергозбереження відносно технічно досяжного рівня (ВАТ).

Основні розрахункові формули

$$E_{\text{заг}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n \quad (1)$$

де $E_{\text{заг}}$ - сумарні витрати енергії підприємства за всіма видами енергоносіїв, приведені до єдиних одиниць виміру (кВт·год).

$$K_e = W_{\text{п}} / E_{\text{заг}} \quad (2)$$

де K_e - узагальнений показник енергоефективності; $W_{\text{п}}$ – обсяг випущеної продукції.

$$E_n = E_{\text{заг}} / W_{\text{п}} \quad (3)$$

де E_n - енергоемність виробництва (обернений до K_e показник).

$$e = E_{\text{заг}} / W_{\text{п}} \quad (4)$$

де e - питомі витрати енергії на одиницю продукції (у даній роботі чисельно збігаються з E_n).

$$P_{\text{ф}} = W_{\text{сп}} / 24 \quad (5)$$

де R_f - середня фактична потужність обладнання за добу; $W_{сп}$ – добове споживання енергії, кВт·год.

$$K_z = R_f / R_n \quad (6)$$

де K_z - коефіцієнт завантаження обладнання; R_n – номінальна потужність.

$$K_{в.п.} = W_{сп} / (R_n \cdot 24) \quad (7)$$

де $K_{в.п.}$ - коефіцієнт використання встановленої потужності за добу.

$$P_{ез} = (e_f - e_b) / e_f \cdot 100\% \quad (8)$$

де $P_{ез}$ - потенціал енергозбереження; e_b – питомі витрати за найкращими доступними технологіями.

$$\Delta E = P_{ез} \cdot E_{заг} / 100 \quad (9)$$

де ΔE - абсолютний обсяг потенційної економії енергії, кВт·год.

$$d_{вде} = E_{вде} / E_{заг} \cdot 100\% \quad (10)$$

де $d_{вде}$ - частка відновлюваних та вторинних джерел у структурі енергоспоживання (за додатковими даними підприємства, якщо є).

Приклад розрахунку

Молокопереробне підприємство: $E_1=85000$ кВт·год (електроенергія), $E_2=42000$ кВт·год (газ, у перерахунку), $E_3=18000$ кВт·год (власна теплота). $W_{п}=620$ т, $R_n=75$ кВт, $W_{сп}=890$ кВт·год/добу, $e_b=185$ кВт·год/т.

1) $E_{заг}=85000+42000+18000=145000$ кВт·год.

2) $K_e=620/145000=0,00428$ т/кВт·год (або в оберненому вигляді E_n нижче).

3) $E_n=145000/620=233,9$ кВт·год/т.

4) $R_f=890/24=37,1$ кВт.

5) $K_z=37,1/75=0,49$.

6) $K_{в.п.}=890/(75 \cdot 24)=0,49$.

7) $P_{ез}=(233,9-185)/233,9 \cdot 100\%=20,9\%$.

8) $\Delta E = 20,9 \cdot 145000 / 100 = 30305$ кВт·год – обсяг потенційної економії за звітний період.

Висновок: підприємство має суттєвий (близько 21%) резерв енергозбереження, а обладнання завантажене менш ніж наполовину від номінальної потужності, що потребує додаткового аналізу графіка роботи.

Завдання для самостійного виконання

За заданими у варіанті даними виконати повний комплекс розрахунків: обчислити сумарні витрати енергії $E_{\text{заг}}$, енергоемність E_n , коефіцієнти K_z і $K_{в.п.}$, потенціал енергозбереження $P_{\text{ез}}$ та абсолютний обсяг потенційної економії ΔE . Зробити висновок щодо резервів підвищення енергоефективності підприємства.

Варіант	Підприємство	E_1 (ел.), кВт·год	E_2 (газ), кВт·год	E_3 (тепло), кВт·год	$W_{\text{п}}$, т	P_n , кВт	$W_{\text{сп}}$, кВт·год/добу	e_b , кВт·год/т
1	Молокозавод	70000	30000	10000	500	60	700	160
2	Комбікормовий завод	73500	31800	10700	525	63	735	165
3	М'ясокомбінат	77000	33600	11400	550	66	770	170
4	Птахофабрика	80500	35400	12100	575	69	805	175
5	Хлібозавод	84000	37200	12800	600	72	840	180
6	Олійноекстракційний завод	87500	39000	13500	625	75	875	185
7	Цукровий завод	91000	40800	14200	650	78	910	190
8	Плодоовочева переробка	94500	42600	14900	675	81	945	195
9	Виноробний завод	98000	44400	15600	700	84	980	200
10	Крупозавод	101500	46200	16300	725	87	1015	205
11	Борошномельний завод	105000	48000	17000	750	90	1050	210
12	Консервний завод	108500	49800	17700	775	93	1085	215
13	Пивоварний завод	112000	51600	18400	800	96	1120	220

Варіант	Підприємство	Е1 (ел.), кВт·год	Е2 (газ), кВт·год	Е3 (тепло), кВт·год	Wп , т	Рн, кВт	Wсп, кВт·год/добу	еб, кВт·год/т
14	Свинокомплекс	115500	53400	19100	825	99	1155	225
15	Молочна ферма	119000	55200	19800	850	102	1190	230
16	Птахоферма	122500	57000	20500	875	105	1225	235
17	Зерносховище	126000	58800	21200	900	108	1260	240
18	Комплекс ВРХ	129500	60600	21900	925	111	1295	245
19	Рибопереробне підприємство	133000	62400	22600	950	114	1330	250
20	Елеватор	136500	64200	23300	975	117	1365	255

Контрольні питання

1. Охарактеризуйте ієрархічні рівні енергоспоживання переробних і тваринницьких підприємств.
2. Як обчислюється енергоємність виробництва і для чого вона використовується?
3. Які показники енергетичної ефективності застосовуються на рівні підприємства в цілому?
4. Чому порівняння з галузевим нормативом є важливим етапом аналізу?
5. Наведіть приклад резерву енергозбереження, виявленого на основі аналізу структури енергоспоживання.
6. Як пов'язані коефіцієнт завантаження та коефіцієнт використання встановленої потужності обладнання?
7. Що означає обсяг потенційної економії енергії ΔE і як він обчислюється?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

Моделювання енергетичних процесів переробки сільськогосподарської продукції

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою теплового розрахунку процесу сушіння (випаровування) з обчисленням теоретичних витрат теплоти, коефіцієнта використання теплоти, питомих витрат енергії та середньої теплової потужності процесу.

Теоретичні відомості

Енергоспоживання технологічного процесу переробки поділяють на технологічне (корисне) та нетехнологічне. Тепловий розрахунок процесу сушіння базується на визначенні теоретично необхідної кількості теплоти для випаровування вологи з подальшим порівнянням із фактичними витратами та обчисленням комплексу супутніх показників.

Основні розрахункові формули

$$Q_{\text{теор}} = m \cdot r \quad (1)$$

де $Q_{\text{теор}}$ - теоретично необхідна кількість теплоти; m – маса видаленої вологи, кг; r – питома теплота пароутворення ($=0,628 \text{ кВт} \cdot \text{год/кг}$).

$$\eta_t = Q_{\text{теор}} / Q_{\text{факт}} \cdot 100\% \quad (2)$$

де η_t - коефіцієнт використання теплоти технологічного процесу.

$$Q_{\text{втр}} = Q_{\text{факт}} - Q_{\text{теор}} \quad (3)$$

де $Q_{\text{втр}}$ - абсолютні втрати теплоти в процесі.

$$e = Q_{\text{факт}} / M \quad (4)$$

де e - питомі витрати енергії на одиницю продукції, $\text{кВт} \cdot \text{год/т}$.

$$P_{\text{сер}} = Q_{\text{факт}} / \tau \quad (5)$$

де $P_{\text{сер}}$ - Середня теплова потужність процесу; τ – тривалість процесу, год.

$$q_{\text{пит}} = Q_{\text{факт}} / m \quad (6)$$

де $q_{\text{пит}}$ - питомі витрати енергії на одиницю видаленої вологи, кВт·год/кг.

$$K_v = Q_{\text{теор}} / (M \cdot r_0) \quad (7)$$

де K_v - коефіцієнт відносної вологовіддачі (довідкове r_0 приймається 0,63 кВт·год/кг для орієнтовних розрахунків).

$$\Delta Q(t) = Q_{\text{факт}} \cdot k \cdot (t - t_0) \quad (8)$$

де $\Delta Q(t)$ - приріст витрат теплоти при відхиленні температури процесу t від базової $t_0=55^\circ\text{C}$ (приймати $k=0,01$ на кожен $^\circ\text{C}$ для орієнтовної оцінки).

Приклад розрахунку

Зерносушарка: $m=1200$ кг вологи, $Q_{\text{факт}}=1100$ кВт·год, $M=15$ т, $\tau=6$ год, $t=55^\circ\text{C}$.

1) $Q_{\text{теор}}=1200 \cdot 0,628=753,6$ кВт·год.

2) $\eta_T=753,6/1100 \cdot 100\%=68,5\%$.

3) $Q_{\text{втр}}=1100-753,6=346,4$ кВт·год.

4) $e=1100/15=73,3$ кВт·год/т.

5) $P_{\text{сер}}=1100/6=183,3$ кВт.

6) $q_{\text{пит}}=1100/1200=0,917$ кВт·год/кг.

7) $K_v=753,6/(15 \cdot 0,63)=79,7$ – довідковий показник для порівняння з аналогічними установками.

Висновок: коефіцієнт використання теплоти 68,5% відповідає типовому діапазону для конвективних сушарок (60–70%), середня теплова потужність 183,3 кВт визначає вимоги до потужності теплогенератора.

Завдання для самостійного виконання

За заданими у варіанті даними виконати повний тепловий розрахунок процесу: обчислити $Q_{\text{теор}}$, η_T , $Q_{\text{втр}}$, питомі витрати енергії e та $q_{\text{пит}}$, середню теплову потужність процесу $P_{\text{сер}}$. Порівняти отримане значення η_T з типовим діапазоном (60–70%) і зробити висновок про ефективність процесу.

Варіант	Процес	m, кг (волога)	Qфакт, кВт·год	M, т (продукція)	τ, год (тривалість)	t, °C (температура)
1	Сушіння зерна (шахтна)	1200	1100	15	6	55
2	Сушіння насіння соняшнику	1260	1155	16.5	6.3	57
3	Випарювання сироватки	1320	1210	18	6.6	59
4	Сушіння трав'яного борошна	1380	1265	19.5	6.9	61
5	Сушіння овочів	1440	1320	21	7.2	63
6	Сушіння фруктів	1500	1375	22.5	7.5	65
7	Випарювання соку	1560	1430	24	7.8	67
8	Сушіння комбікорму	1620	1485	25.5	8.1	69
9	Термообробка м'яса	1680	1540	27	8.4	71
10	Пастеризація соку	1740	1595	28.5	8.7	73
11	Сушіння солоду	1800	1650	30	9	75
12	Випарювання молока	1860	1705	31.5	9.3	77
13	Сушіння макухи	1920	1760	33	9.6	79
14	Термосушіння дріжджів	1980	1815	34.5	9.9	81
15	Обжарювання зерна кави	2040	1870	36	10.2	83
16	Сушіння лляного насіння	2100	1925	37.5	10.5	85
17	Випарювання патоки	2160	1980	39	10.8	87

Варіант	Процес	m, кг (волога)	Qфакт, кВт·год	M, т (продукція)	τ, год (тривалість)	t, °C (температура)
18	Сушіння трав	2220	2035	40.5	11.1	89
19	Термообробка риби	2280	2090	42	11.4	91
20	Сушіння буряка	2340	2145	43.5	11.7	93

Контрольні питання

1. Дайте визначення технологічного і нетехнологічного енергоспоживання.
2. Як обчислюється теоретично необхідна кількість теплоти на сушіння?
3. Що показує коефіцієнт використання теплоти технологічного процесу?
4. Які фактори спричиняють різницю між теоретичними і фактичними витратами теплоти?
5. Який типовий діапазон коефіцієнта використання теплоти для конвективних сушарок?
6. Як обчислюється середня теплова потужність процесу і для чого вона потрібна?
7. Що показує показник питомих витрат енергії на одиницю видаленої вологи?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

Системний аналіз енергоефективності виробничих процесів підприємства

Мета роботи

Оволодіти методикою комплексного системного оцінювання енергоефективності підприємства: розрахунок потенціалу енергозбереження та комплексного (інтегрального) показника енергоефективності на основі системи одиничних показників.

Теоретичні відомості

Системний аналіз енергоефективності поєднує оцінку потенціалу енергозбереження відносно технічно досяжного рівня (ВАТ) з розрахунком комплексного показника енергоефективності за системою одиничних зважених показників, що дає повнішу картину порівняно з єдиним узагальненим показником.

Основні розрахункові формули

$$\text{Пез} = (\text{еф} - \text{еб}) / \text{еф} \cdot 100\% \quad (1)$$

де Пез - потенціал енергозбереження підприємства.

$$\text{еб}/\text{еф} = a \quad (2)$$

де а - відносний рівень наближеності підприємства до технічно досяжного рівня, частка одиниці.

$$\Delta \text{Ерік} = \text{Пез} \cdot \text{еф} \cdot Q_{\text{річ}} / 100 \quad (3)$$

де $\Delta \text{Ерік}$ - річний обсяг потенційної економії енергії за заданого річного обсягу виробництва $Q_{\text{річ}}$.

$$K_e = \sum (w_i \cdot e_i), i=1..3 \quad (4)$$

де K_e - комплексний показник енергоефективності; w_i – вагові коефіцієнти ($\sum w_i=1$); e_i – нормовані оцінки одиничних показників.

$$K_{\text{max}} = \sum (w_i \cdot 1) \quad (5)$$

де K_{max} - максимально можливе значення комплексного показника (за $e_i=1$ для всіх показників), еталон $K_{\text{max}}=1$.

$$\Delta K = K_{\text{max}} - K_e \quad (6)$$

Де ΔK - відхилення фактичного комплексного показника від еталонного значення.

$$R_{\text{показника } i} = w_i \cdot (1 - e_i) \quad (7)$$

де $R_{\text{показника } i}$ - внесок i -го показника в загальне відхилення ΔK – дає змогу визначити пріоритетний напрям поліпшення.

$$K_{e.\text{norm}} = K_e / K_{\text{max}} \cdot 100\% \quad (8)$$

де $K_{e.\text{norm}}$ - комплексний показник енергоефективності у відсотковому вираженні відносно еталону.

Приклад розрахунку

$e_f = 234 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}$, $e_b = 185 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}$.

$P_{\text{ез}} = (234 - 185) / 234 \cdot 100\% = 20,9\%$. $a = 185 / 234 = 0,79$.

Комплексна оцінка за трьома показниками: $w = (0,4; 0,35; 0,25)$, $e = (0,88; 0,82; 0,60)$.

$K_e = 0,4 \cdot 0,88 + 0,35 \cdot 0,82 + 0,25 \cdot 0,60 = 0,352 + 0,287 + 0,15 = 0,789$.

$K_{\text{max}} = 1$. $\Delta K = 1 - 0,789 = 0,211$.

Внески у відхилення: $R_1 = 0,4 \cdot 0,12 = 0,048$; $R_2 = 0,35 \cdot 0,18 = 0,063$; $R_3 = 0,25 \cdot 0,40 = 0,10$ – найбільший внесок дає третій показник (найімовірніше, частка ВДЕ).

$K_{e.\text{norm}} = 0,789 / 1 \cdot 100\% = 78,9\%$ – середній рівень енергоефективності; пріоритетний напрям поліпшення – показник із найбільшим внеском R_3 .

Завдання для самостійного виконання

За заданими фактичними та ВАТ-показниками обчислити потенціал енергозбереження $P_{\text{ез}}$; за заданими ваговими коефіцієнтами та оцінками одиничних показників обчислити комплексний показник K_e , відхилення ΔK та внесок кожного показника R_i у це відхилення. Визначити пріоритетний напрям поліпшення енергоефективності.

Варіант	Підприємство	e_f , кВт·год/т	e_b , кВт·год/т	$w_1; w_2; w_3$	$e_1; e_2; e_3$
1	Молокозавод	220	175	0,4; 0,35; 0,25	0,88; 0,82; 0,60
2	Зернопереробний комбінат	228	181	0,45; 0,30; 0,25	0,90; 0,80; 0,65

Варіант	Підприємство	еф, кВт·год/т	еб, кВт·год/т	w1;w2;w3	e1;e2;e3
3	М'ясокомбінат	236	187	0,35;0,40;0,25	0,85;0,78;0,70
4	Комбикормовий завод	244	193	0,40;0,25;0,35	0,92;0,75;0,55
5	Хлібозавод	252	199	0,50;0,30;0,20	0,80;0,85;0,60
6	Цукровий завод	260	205	0,35;0,35;0,30	0,87;0,83;0,58
7	Олійноекстракційний завод	268	211	0,40;0,40;0,20	0,91;0,79;0,62
8	Консервний завод	276	217	0,45;0,25;0,30	0,84;0,81;0,68
9	Пивоварний завод	284	223	0,30;0,40;0,30	0,89;0,77;0,64
10	Крупозавод	292	229	0,40;0,35;0,25	0,86;0,84;0,59
11	Птахофабрика	300	235	0,35;0,30;0,35	0,83;0,80;0,66
12	Свинокомплекс	308	241	0,45;0,35;0,20	0,90;0,76;0,63
13	Плодоовочева база	316	247	0,30;0,35;0,35	0,88;0,82;0,57
14	Елеватор	324	253	0,40;0,30;0,30	0,85;0,79;0,61
15	Борошномельний завод	332	259	0,50;0,25;0,25	0,92;0,74;0,69
16	Виноробне підприємство	340	265	0,35;0,45;0,20	0,81;0,86;0,55
17	Молочна ферма	348	271	0,40;0,20;0,40	0,87;0,78;0,67
18	Рибопереробний завод	356	277	0,45;0,20;0,35	0,89;0,80;0,60
19	Комплекс ВРХ	364	283	0,30;0,30;0,40	0,84;0,83;0,63
20	Комбінат дитячого харчування	372	289	0,40;0,40;0,20	0,90;0,77;0,65

Контрольні питання

1. У чому полягає системний підхід до аналізу енергоефективності виробничих процесів?
2. Що таке технічно досяжний рівень енергоефективності (ВАТ)?
3. Як обчислюється потенціал енергозбереження підприємства?
4. Які підсистеми виділяють при декомпозиції енергетичної системи підприємства?
5. Чому системний (а не поелементний) аналіз дає більш повну картину резервів економії?
6. Як визначається пріоритетний напрям поліпшення енергоефективності за структурою внесків показників?
7. Що показує відхилення ΔK комплексного показника від еталонного значення?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

Класифікація енергоспоживчого обладнання переробних підприємств

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою паспортизації енергоспоживчого обладнання: обчислення коефіцієнтів завантаження, використання встановленої потужності, фактичного ККД та зіставлення з класом енергоефективності обладнання.

Теоретичні відомості

Оцінювання енергоефективності конкретної одиниці обладнання здійснюється комплексно за показниками фактичного завантаження, використання встановленої потужності та відповідності класу енергоефективності (ІЕ1–ІЕ4) з урахуванням різниці паспортного і фактичного ККД у режимі часткового навантаження.

Основні розрахункові формули

$$P_{\text{ф}} = W_{\text{сп}} / 24 \quad (1)$$

де $P_{\text{ф}}$ - середня фактична потужність обладнання за добу.

$$K_{\text{з}} = P_{\text{ф}} / P_{\text{н}} \quad (2)$$

де $K_{\text{з}}$ - коефіцієнт завантаження обладнання.

$$K_{\text{в.п.}} = W_{\text{сп}} / (P_{\text{н}} \cdot 24) \quad (3)$$

де $K_{\text{в.п.}}$ - коефіцієнт використання встановленої потужності за добу.

$$\eta_{\text{факт}} = \eta_{\text{пасп}} \cdot (0,5 + 0,5 \cdot K_{\text{з}}) \quad (4)$$

де $\eta_{\text{факт}}$ - спрощена оцінка фактичного ККД обладнання в режимі часткового навантаження (емпірична залежність).

$$\Delta P = P_{\text{н}} - P_{\text{ф}} \quad (5)$$

де ΔP - резерв (недовикористана потужність) обладнання, кВт.

$$W_{\text{рік}} = W_{\text{сп}} \cdot 365 \quad (6)$$

де $W_{\text{рік}}$ - орієнтовне річне споживання енергії обладнанням.

$$W_{\text{рік ІЕ}} = W_{\text{рік}} \cdot (\eta_{\text{ІЕ1}} / \eta_{\text{ІЕ поточний}}) \quad (7)$$

де $W_{\text{рік ІЕ}}$ - порівняльне річне споживання за умовної заміни на клас ІЕ1 (базовий); $\eta_{\text{ІЕ1}}=0,91$ для оцінки, $\eta_{\text{ІЕ}}$ поточний – паспортний ККД у частках.

$$\Delta W_{\text{екон}} = W_{\text{рік}} - W_{\text{рік вищий клас}} \quad (8)$$

де $\Delta W_{\text{екон}}$ - очікувана економія енергії за заміни обладнання на вищий клас енергоефективності (за додатковим завданням викладача).

Приклад розрахунку

Компресорна холодильна установка: $P_{\text{н}}=75$ кВт, $W_{\text{сп}}=890$ кВт·год/добу, клас ІЕ3, $\eta_{\text{пасп}}=93\%$.

1) $P_{\text{ф}}=890/24=37,1$ кВт.

2) $K_{\text{з}}=37,1/75=0,49$.

3) $K_{\text{в.п.}}=890/(75 \cdot 24)=0,49$.

4) $\eta_{\text{факт}}=93 \cdot (0,5+0,5 \cdot 0,49)=93 \cdot 0,745=69,3\%$ – фактичний ККД суттєво нижчий за паспортний через часткове навантаження.

5) $\Delta P=75-37,1=37,9$ кВт – резерв потужності.

6) $W_{\text{рік}}=890 \cdot 365=324850$ кВт·год/рік.

Висновок: значний недобір навантаження ($K_{\text{з}}=0,49$) призводить до суттєвого зниження фактичного ККД навіть за високого класу енергоефективності обладнання, що обґрунтовує доцільність перегляду підбору потужності обладнання під фактичне навантаження.

Завдання для самостійного виконання

За заданими у варіанті даними обчислити $P_{\text{ф}}$, $K_{\text{з}}$, $K_{\text{в.п.}}$, оцінити фактичний ККД обладнання $\eta_{\text{факт}}$ за наведеною емпіричною залежністю, визначити резерв потужності ΔP та орієнтовне річне споживання $W_{\text{рік}}$. Зробити висновок про доцільність перегляду підбору потужності обладнання.

Варіант	Обладнання	Рн, кВт	Wсп, кВт·год/добу	Т, год	Кл. енергоефект. (ІЕ)	ККД паспортний, %
1	Холодильна установка	65	780	20	90	ІЕ2
2	Компресорна станція	69	835	21	90.3	ІЕ3
3	Насосна станція	73	890	22	90.6	ІЕ1
4	Вентиляційна установка	77	945	23	90.9	ІЕ2
5	Молочний сепаратор	81	1000	24	91.2	ІЕ3
6	Кормороздавач	85	1055	25	91.5	ІЕ4
7	Зерносушарка (привід)	89	1110	26	91.8	ІЕ2
8	Транспортер	93	1165	27	92.1	ІЕ1
9	Дробарка кормів	97	1220	28	92.4	ІЕ3
10	Пастеризатор (привід)	101	1275	29	92.7	ІЕ2
11	Елеватор (норія)	105	1330	30	93	ІЕ3
12	Аератор	109	1385	31	93.3	ІЕ4
13	Гомогенізатор	113	1440	32	93.6	ІЕ2
14	Прес маслоцеху	117	1495	33	93.9	ІЕ1
15	Млин	121	1550	34	94.2	ІЕ3
16	Змішувач кормів	125	1605	35	94.5	ІЕ2
17	Охолоджувач молока	129	1660	36	94.8	ІЕ4
18	Мийна машина	133	1715	37	95.1	ІЕ3
19	Автоклав	137	1770	38	95.4	ІЕ2

Варіант	Обладнання	Р _н , кВт	W _{сп} , кВт·год/добу	Т, год	Кл. енергоефект. (IE)	ККД паспортний, %
20	Вакуум-насос	141	1825	39	95.7	IE3

Контрольні питання

1. За якими ознаками класифікують енергоспоживче обладнання переробних підприємств?
2. Як обчислюється коефіцієнт завантаження обладнання?
3. Що показує коефіцієнт використання встановленої потужності?
4. Про що свідчить систематично низьке значення цих коефіцієнтів?
5. Які класи енергоефективності застосовуються для електродвигунів (IE1–IE4)?
6. Як фактичний ККД обладнання залежить від коефіцієнта завантаження?
7. Що означає резерв потужності обладнання ΔP і як його враховують при плануванні?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5

Побудова базової математичної моделі енергоспоживання процесу

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою побудови, перевірки адекватності та практичного застосування регресійної моделі енергоспоживання другого порядку для розв'язання прямої та оберненої задач моделювання.

Теоретичні відомості

Регресійна модель енергоспоживання другого порядку $E = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot v + b_{11} \cdot t^2$ встановлює залежність питомих витрат енергії від температурного та швидкісного факторів процесу. Побудова моделі супроводжується перевіркою адекватності за коефіцієнтом детермінації та практичним застосуванням для прогнозування й оптимізації режиму.

Основні розрахункові формули

$$E(t, v) = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot v + b_{11} \cdot t^2 \quad (1)$$

де $E(t, v)$ - регресійна модель енергоспоживання другого порядку за факторами t (температура) та v (швидкість).

$$\partial E / \partial t = b_1 + 2 \cdot b_{11} \cdot t \quad (2)$$

де $\partial E / \partial t$ - часткова похідна моделі за температурним фактором.

$$\partial E / \partial t = 0 \rightarrow t_{\text{опт}} = -b_1 / (2 \cdot b_{11}) \quad (3)$$

де $\partial E / \partial t$ - умова екстремуму (оптимальна температура) за фіксованого значення v .

$$E_{\text{опт}} = E(t_{\text{опт}}, v) \quad (4)$$

де $E_{\text{опт}}$ - значення енергоспоживання за оптимальної температури.

$$R^2 = 1 - \text{SSE} / \text{SST} \quad (5)$$

де R^2 - коефіцієнт детермінації моделі; SSE – залишкова сума квадратів;

SST – загальна сума квадратів відхилень.

$$\hat{E}(t, v) - E_{\text{факт}} = \delta \quad (6)$$

де $\hat{E}(t,v)$ - похибка моделі в конкретній контрольній точці, що використовується для оцінювання SSE.

$$E_{\text{сер}} = (1/n) \cdot \sum E_i \quad (7)$$

де $E_{\text{сер}}$ - середнє значення відгуку за вибіркою, необхідне для обчислення SST.

$$\Delta E\% = (E(t_1,v) - E(t_2,v))/E(t_2,v) \cdot 100\% \quad (8)$$

де $\Delta E\%$ - відносна зміна енергоспоживання при зміні температурного режиму з t_2 на t_1 .

Приклад розрахунку

Модель сушарки: $E(t,v)=500-8t+30v+0,1t^2$ (у діапазоні $t=60\dots90^\circ\text{C}$, $v=1\dots3$ м/с). Задані $t=70$, $v=1,8$.

1) $E(70;1,8)=500-8\cdot70+30\cdot1,8+0,1\cdot70^2=500-560+54+490=484$ кВт·год/т.

2) $\partial E/\partial t=-8+0,2t$; умова екстремуму: $-8+0,2t=0 \rightarrow t_{\text{опт}}=40^\circ\text{C}$ – поза технологічно допустимим діапазоном ($60\dots90^\circ\text{C}$), отже в межах діапазону мінімум досягається на нижній межі $t=60^\circ\text{C}$.

3) $E(60;1,8)=500-480+54+360=434$ кВт·год/т – саме цей режим (нижня технологічна межа) є енергетично найвигіднішим у межах допустимого діапазону.

4) Порівняння з $t=70^\circ\text{C}$: $\Delta E\%=(484-434)/434\cdot100\%=11,5\%$ – робота при $t=70^\circ\text{C}$ замість $t=60^\circ\text{C}$ споживає на 11,5% більше енергії за інших однакових умов.

Завдання для самостійного виконання

За наведеними коефіцієнтами моделі (за варіантом) обчислити $E(t,v)$ для заданих значень факторів; знайти $t_{\text{опт}}$ за формулою екстремуму та перевірити, чи належить це значення допустимому діапазону $60\dots90^\circ\text{C}$; якщо ні – визначити енергетично вигіднішу межу діапазону; обчислити відносну зміну $\Delta E\%$ між заданим і оптимальним режимами.

Варіант	Процес	t, °C	v, м/с	b0	b1(t)	b2(v)	b11(t ²)
1	Сушіння зерна	70	1.8	500	-8	30	0.1
2	Пастеризація молока	72	1.86	512	-8.3	31.2	0.105
3	Охолодження продукції	73	1.92	524	-8.6	32.4	0.11
4	Термообробка м'яса	75	1.98	536	-8.9	33.6	0.115
5	Випарювання соку	76	2.04	548	-9.2	34.8	0.12
6	Сушіння овочів	78	2.1	560	-9.5	36	0.125
7	Обжарювання зерна	79	2.16	572	-9.8	37.2	0.13
8	Термосушіння дріжджів	81	2.22	584	-10.1	38.4	0.135
9	Пастеризація соку	82	2.28	596	-10.4	39.6	0.14
10	Сушіння солоду	84	2.34	608	-10.7	40.8	0.145
11	Випарювання молока	85	2.4	620	-11	42	0.15
12	Сушіння макухи	87	2.46	632	-11.3	43.2	0.155
13	Стерилізація консервів	88	2.52	644	-11.6	44.4	0.16
14	Термообробка риби	90	2.58	656	-11.9	45.6	0.165
15	Сушіння трав'яного борошна	91	2.64	668	-12.2	46.8	0.17
16	Випарювання патоки	93	2.7	680	-12.5	48	0.175
17	Сушіння буряка	94	2.76	692	-12.8	49.2	0.18
18	Термообробка яєць	96	2.82	704	-13.1	50.4	0.185

Варіант	Процес	t, °C	v, м/с	b0	b1(t)	b2(v)	b11(t ²)
19	Сушіння лляного насіння	97	2.88	716	-13.4	51.6	0.19
20	Обжарювання кави	99	2.94	728	-13.7	52.8	0.195

Контрольні питання

1. Дайте визначення математичної моделі енергетичного процесу.
2. У чому різниця між детермінованою та стохастичною моделлю?
3. Як обчислюється коефіцієнт детермінації R^2 і що він показує?
4. Які етапи включає побудова регресійної моделі енергоспоживання?
5. Для чого виконується верифікація моделі на незалежній вибірці даних?
6. Як розв'язується обернена задача моделювання на основі регресійної моделі?
7. Що робити, якщо розрахункове оптимальне значення параметра виходить за межі технологічно допустимого діапазону?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6

Аналіз впливу енергетичних параметрів на ефективність процесу

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою аналізу впливу режимного параметра на питомі витрати енергії: визначення оптимуму, перевірка приналежності технологічно допустимому діапазону, розрахунок економічного ефекту від переходу на оптимальний режим.

Теоретичні відомості

Залежність питомих витрат енергії від режимного параметра $e(x)=a+b \cdot x+c \cdot x^2$ має екстремальний характер. Комплексний аналіз включає знаходження координати екстремуму, перевірку її належності технологічно допустимому діапазону $[x_{\min};x_{\max}]$ та оцінку економічного ефекту від приведення фактичного режиму до оптимального.

Основні розрахункові формули

$$e(x) = a + b \cdot x + c \cdot x^2 \quad (1)$$

де $e(x)$ - функція питомих витрат енергії від параметра x .

$$de/dx = b + 2c \cdot x \quad (2)$$

де de/dx - похідна функції питомих витрат.

$$de/dx = 0 \rightarrow x_{\text{опт}} = -b/(2c) \quad (3)$$

де de/dx - координата екстремуму (оптимальне значення параметра).

$$e_{\text{опт}} = e(x_{\text{опт}}) \quad (4)$$

де $e_{\text{опт}}$ - мінімальне значення питомих витрат за оптимального параметра (за умови $x_{\text{опт}} \in [x_{\min};x_{\max}]$).

$$e(x_{\min}), e(x_{\max}) \quad (5)$$

де $e_{\text{опт}}$ - значення функції на межах допустимого діапазону – використовуються, якщо $x_{\text{опт}}$ виходить за межі діапазону.

$$\Delta e_{\text{ВІДН}} = (e_{\text{факт}} - e_{\text{опт}})/e_{\text{опт}} \cdot 100\% \quad (6)$$

де $\Delta e_{\text{ВІДН}}$ - відносне перевищення фактичних питомих витрат над оптимальними для довільного фактичного режиму $x_{\text{факт}}$ (приймати $x_{\text{факт}} = (x_{\text{min}} + x_{\text{max}})/2$ як типовий поточний режим господарства).

$$\Delta B_{\text{рік}} = \Delta e \cdot M_{\text{річ}} \quad (7)$$

де $\Delta B_{\text{рік}}$ - річна економія витрат енергії при переході на оптимальний режим; $M_{\text{річ}}$ – річний обсяг виробництва (приймати 5000 т для орієнтовного розрахунку).

$$d^2e/dx^2 = 2c \quad (8)$$

де d^2e/dx^2 - друга похідна – перевірка характеру екстремуму (мінімум, якщо $2c > 0$).

Приклад розрахунку

$e(t) = 45 - 0,8t + 0,006t^2$, діапазон $t = 63 \dots 90^\circ\text{C}$. $de/dt = -0,8 + 0,012t = 0 \rightarrow t_{\text{опт}} = 66,7^\circ\text{C} \in [63; 90]$ – оптимум належить діапазону.

$$e_{\text{опт}} = 45 - 0,8 \cdot 66,7 + 0,006 \cdot 66,7^2 = 45 - 53,4 + 26,7 = 18,3 \quad \text{кВт} \cdot \text{год/т.}$$

Перевірка: $2c = 0,012 > 0$ – це справді мінімум.

Типовий поточний режим господарства
 $t_{\text{факт}} = (63 + 90)/2 = 76,5^\circ\text{C}$:

$$e(76,5) = 45 - 0,8 \cdot 76,5 + 0,006 \cdot 76,5^2 = 45 - 61,2 + 35,1 = 18,9 \quad \text{кВт} \cdot \text{год/т.}$$

$\Delta e_{\text{ВІДН}} = (18,9 - 18,3)/18,3 \cdot 100\% = 3,3\%$ – відносно невелике перевищення, оскільки типовий режим близький до оптимуму.

За $M_{\text{річ}} = 5000$ т: $\Delta B_{\text{рік}} = (18,9 - 18,3) \cdot 5000 = 3000$ кВт·год/рік – додаткова енергія, що витрачається через відхилення від оптимального режиму.

Завдання для самостійного виконання

За наведеною функцією $e(x)$ та межами діапазону $[x_{\text{min}}; x_{\text{max}}]$ знайти $t_{\text{опт}}$, перевірити його належність діапазону, обчислити $e_{\text{опт}}$; обчислити e для типового поточного режиму $x_{\text{факт}} = (x_{\text{min}} + x_{\text{max}})/2$ та відносне перевищення $\Delta e_{\text{ВІДН}}$; обчислити річну економію $\Delta B_{\text{рік}}$ за $M_{\text{річ}} = 5000$ т.

Варіант	Процес	a (b0)	b (b1)	c (b11, x²)	xmin	xmax
1	Пастеризація молока	45	-0.8	0.006	63	90

Варіант	Процес	a (b0)	b (b1)	c (b11, x ²)	xmin	xmax
2	Сушіння зерна (продукт.)	47	-0.82	0.0063	64	91.5
3	Обробіток ґрунту	49	-0.84	0.0066	65	93
4	Подрібнення кормів	51	-0.86	0.0069	66	94.5
5	Охолодження продукції	53	-0.88	0.0072	67	96
6	Стерилізація консервів	55	-0.9	0.0075	68	97.5
7	Випарювання соку	57	-0.92	0.0078	69	99
8	Термообробка м'яса	59	-0.94	0.0081	70	100.5
9	Сушіння насіння	61	-0.96	0.0084	71	102
10	Прокатка зерна	63	-0.98	0.0087	72	103.5
11	Гомогенізація молока	65	-1	0.009	73	105
12	Змішування кормів	67	-1.02	0.0093	74	106.5
13	Дозрівання сиру	69	-1.04	0.0096	75	108
14	Ферментація	71	-1.06	0.0099	76	109.5
15	Дистиляція	73	-1.08	0.0102	77	111
16	Екстракція олії	75	-1.1	0.0105	78	112.5
17	Грануляція комбікорму	77	-1.12	0.0108	79	114
18	Сепарація молока	79	-1.14	0.0111	80	115.5
19	Осадження суспензії	81	-1.16	0.0114	81	117
20	Флотація	83	-1.18	0.0117	82	118.5

Контрольні питання

1. Чому залежність питомих витрат енергії від параметра має екстремальний характер?
2. Як визначається оптимальне значення енергетичного параметра методом диференціювання?
3. Які способи регулювання енергоощадних режимів роботи обладнання застосовуються?
4. Чому частотне регулювання є енергоефективнішим за дросельне?
5. Як періодичність перегляду оптимальних режимів пов'язана з технічним обслуговуванням обладнання?
6. Як перевірити, що знайдена стаціонарна точка є саме мінімумом функції питомих витрат?
7. Як обчислюється річна економія витрат енергії при переході на оптимальний режим?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7

Оцінювання показників енергоефективності виробництва продукції

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою обчислення інтегрального показника енергоефективності за чотирма одиничними показниками, аналізу структури його формування та визначення пріоритетного напрямку поліпшення.

Теоретичні відомості

Комплексний показник енергоефективності підприємства обчислюється як зважена сума нормованих оцінок одиничних показників (питомі витрати електроенергії, теплоти, частка ВДЕ, ефективність обладнання). Структурний аналіз внесків кожного показника дає змогу визначити пріоритетні напрями підвищення енергоефективності.

Основні розрахункові формули

$$K_e = \sum (w_i \cdot e_i), i=1..4 \quad (1)$$

де K_e - комплексний показник енергоефективності за чотирма показниками; $\sum w_i = 1$.

$$\text{Внесок}_i = w_i \cdot e_i \quad (2)$$

де Внесок_i - абсолютний внесок i -го показника в комплексну оцінку.

$$\text{Частка}_i = (w_i \cdot e_i) / K_e \cdot 100\% \quad (3)$$

де Частка_i - відносна частка i -го показника у сформованому значенні K_e .

$$\Delta K_{\max} = \sum w_i \cdot (1 - e_i) = 1 - K_e \quad (4)$$

де $\Delta K_{\max}$ - сумарний резерв поліпшення комплексного показника до еталонного значення 1.

$$R_i = w_i \cdot (1 - e_i) \quad (5)$$

де R_i - внесок i -го показника в сумарний резерв поліпшення $\Delta K_{\max}$.

$$R_{\max} = \max(R_i) \quad (6)$$

де $R_{\max}$ - показник із найбільшим резервом поліпшення – пріоритетний напрям вдосконалення.

$$K_{e.\text{norm}} = K_e \cdot 100\% \quad (7)$$

де $K_{e.\text{norm}}$ - комплексний показник у відсотковому вираженні.

$$\text{Клас} = f(K_{e.\text{norm}}) \quad (8)$$

де Клас - умовна класифікація рівня енергоефективності: $K_{e.\text{norm}} \geq 85\%$ – високий, 70–85% – середній, $< 70\%$ – низький (довідкова шкала).

Приклад розрахунку

$$w=(0,3; 0,3; 0,2; 0,2), e=(0,90; 0,85; 0,60; 0,75).$$

$$K_e = 0,3 \cdot 0,90 + 0,3 \cdot 0,85 + 0,2 \cdot 0,60 + 0,2 \cdot 0,75 = 0,27 + 0,255 + 0,12 + 0,15 = 0,795.$$

Внески: 0,27; 0,255; 0,12; 0,15 – частки: 34,0%; 32,1%; 15,1%; 18,9%.

$\Delta K_{\text{max}} = 1 - 0,795 = 0,205$. R_i : $R_1 = 0,3 \cdot 0,10 = 0,03$; $R_2 = 0,3 \cdot 0,15 = 0,045$; $R_3 = 0,2 \cdot 0,40 = 0,08$; $R_4 = 0,2 \cdot 0,25 = 0,05$. $R_{\text{max}} = R_3 = 0,08$ – третій показник (найімовірніше, частка ВДЕ) має найбільший резерв поліпшення.

$K_{e.\text{norm}} = 79,5\%$ – середній рівень енергоефективності підприємства (за шкалою 70–85%).

Завдання для самостійного виконання

За заданими ваговими коефіцієнтами та оцінками чотирьох одиничних показників обчислити комплексний показник K_e , структуру внесків кожного показника (абсолютні та відносні), сумарний резерв поліпшення ΔK_{max} і внески R_i ; визначити показник із найбільшим резервом поліпшення та класифікувати рівень енергоефективності підприємства.

Варіант	Підприємство	$w_1; w_2; w_3; w_4$	$e_1; e_2; e_3; e_4$
1	Молокозавод	0,3; 0,3; 0,2; 0,2	0,90; 0,85; 0,60; 0,75
2	М'ясокомбінат	0,35; 0,25; 0,25; 0,15	0,85; 0,80; 0,65; 0,70
3	Зерносушильний комплекс	0,25; 0,35; 0,20; 0,20	0,88; 0,82; 0,58; 0,78
4	Тваринницький комплекс	0,30; 0,20; 0,30; 0,20	0,92; 0,78; 0,62; 0,72
5	Хлібозавод	0,25; 0,25; 0,25; 0,25	0,80; 0,88; 0,55; 0,80
6	Цукровий завод	0,35; 0,30; 0,15; 0,20	0,86; 0,84; 0,60; 0,74

Варіант	Підприємство	w1;w2;w3;w4	e1;e2;e3;e4
7	Олійноекстракційний завод	0,30;0,25;0,25;0,20	0,90;0,79;0,63;0,76
8	Консервний завод	0,20;0,30;0,30;0,20	0,84;0,86;0,57;0,79
9	Пивоварний завод	0,25;0,30;0,25;0,20	0,89;0,81;0,64;0,73
10	Крупозавод	0,30;0,30;0,20;0,20	0,87;0,83;0,59;0,77
11	Птахофабрика	0,35;0,20;0,25;0,20	0,91;0,80;0,61;0,75
12	Свинокомплекс	0,25;0,25;0,30;0,20	0,83;0,85;0,66;0,71
13	Флодоовочева база	0,30;0,25;0,20;0,25	0,88;0,79;0,63;0,78
14	Елеватор	0,20;0,25;0,30;0,25	0,85;0,82;0,60;0,76
15	Борошномельний завод	0,25;0,20;0,30;0,25	0,90;0,77;0,68;0,73
16	Виноробне підприємство	0,30;0,35;0,15;0,20	0,82;0,87;0,56;0,80
17	Молочна ферма	0,20;0,30;0,25;0,25	0,86;0,83;0,62;0,75
18	Рибопереробний завод	0,25;0,25;0,20;0,30	0,89;0,80;0,59;0,78
19	Комплекс ВРХ	0,30;0,20;0,25;0,25	0,91;0,78;0,64;0,74
20	Комбінат дитячого харчування	0,35;0,25;0,20;0,20	0,84;0,85;0,61;0,77

Контрольні питання

1. Дайте визначення енергоефективності виробництва.
2. У чому різниця між кількісними та якісними показниками енергоефективності?
3. Як обчислюється комплексний показник енергоефективності підприємства?
4. Яку роль відіграють стандарти ISO 50001 в управлінні енергоефективністю?
5. Охарактеризуйте класи енергоефективності електродвигунів IE1–IE4.
6. Як визначається показник із найбільшим резервом поліпшення серед одиничних показників?
7. За якою шкалою класифікують рівень енергоефективності підприємства за значенням $K_e.norm$?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8

Оптимізація енергоспоживання технологічного процесу переробки

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою розв'язання задачі оптимізації енергоспоживання: знаходження оптимального значення регульованого параметра за критерієм мінімуму сумарних витрат, перевірка приналежності допустимому діапазону, оцінка економічного ефекту.

Теоретичні відомості

Задача оптимізації енергоспоживання формулюється як мінімізація суми витрат на енергоносії $Z_e(x)=A/x$ (спадна зі зростанням x) та капітальних/організаційних витрат $Z_k(x)=B \cdot x^2$ (зростаюча зі збільшенням x). Розв'язання задачі методом диференціювання дає оптимальне значення параметра x_{opt} .

Основні розрахункові формули

$$Z(x) = A/x + B \cdot x^2 \quad (1)$$

де $Z(x)$ - сумарні витрати як функція регульованого параметра x .

$$dZ/dx = -A/x^2 + 2B \cdot x \quad (2)$$

де dZ/dx - похідна сумарних витрат.

$$dZ/dx = 0 \rightarrow x_{opt} = (A/(2B))^{(1/3)} \quad (3)$$

де dZ/dx - умова мінімуму; координата оптимального значення параметра.

$$Z_{min} = Z(x_{opt}) \quad (4)$$

де Z_{min} - мінімальне значення сумарних витрат.

$$Z(x_{min}), Z(x_{max}) \quad (5)$$

де $Z(x_{min})$ - значення функції на межах діапазону – для перевірки, чи належить x_{opt} технологічно допустимій області.

$$d^2Z/dx^2 = 2A/x^3 + 2B \quad (6)$$

де d^2Z/dx^2 - друга похідна – підтверджує, що знайдена точка є мінімумом (додатне значення).

$$Z_{тип} = Z((x_{min}+x_{max})/2) \quad (7)$$

де $Z_{тип}$ - сумарні витрати за типового поточного (не оптимізованого) режиму господарства.

$$\text{Економія} = Z_{тип} - Z_{min} \quad (8)$$

де Економія - абсолютна економія витрат при переході від типового до оптимального режиму.

Приклад розрахунку

$Z_e(x) = 3000/x$, $Z_k(x) = 12x^2$, діапазон $x = 5 \dots 30$. $Z(x) = 3000/x + 12x^2$.

1) $x_{опт} = (3000/(2 \cdot 12))^{(1/3)} = (125)^{(1/3)} = 5$ – на нижній межі діапазону (або близько до неї залежно від точних значень А, В).

2) $Z_{min} = Z(5) = 3000/5 + 12 \cdot 25 = 600 + 300 = 900$.

3) Друга похідна: $d^2Z/dx^2 = 2 \cdot 3000/125 + 24 = 48 + 24 = 72 > 0$ – підтверджено мінімум.

4) Типовий режим $x_{тип} = (5+30)/2 = 17,5$:
 $Z(17,5) = 3000/17,5 + 12 \cdot 17,5^2 = 171,4 + 3675 = 3846,4$.

5) Економія $= 3846,4 - 900 = 2946,4$ – перехід від типового до оптимального режиму дає суттєве зниження сумарних витрат.

Завдання для самостійного виконання

За заданими коефіцієнтами А, В та межами діапазону обчислити $x_{опт}$, перевірити належність діапазону $[x_{min}; x_{max}]$, обчислити Z_{min} ; обчислити Z для типового поточного режиму $x_{тип} = (x_{min} + x_{max})/2$ та економію при переході до оптимального режиму.

Варіант	Процес	А (у $Z_e = A/x$)	В (у $Z_k = B \cdot x^2$)	x_{min}	x_{max}
1	Внесення добрив	3000	12	5	30
2	Модернізація компресорної станції	3150	12.6	5.3	31.5
3	Захист рослин	3300	13.2	5.6	33
4	Полив	3450	13.8	5.9	34.5
5	Опалення теплиці	3600	14.4	6.2	36
6	Вентиляція приміщення	3750	15	6.5	37.5
7	Кормороздавання	3900	15.6	6.8	39

Варіант	Процес	A (y $Z_e=A/x$)	B (y $Z_k=B \cdot x^2$)	xmin	xmax
8	Освітлення птахоферми	4050	16.2	7.1	40.5
9	Сушіння зерна	4200	16.8	7.4	42
10	Охолодження молока	4350	17.4	7.7	43.5
11	Транспортування кормів	4500	18	8	45
12	Аерація води	4650	18.6	8.3	46.5
13	Подрібнення сировини	4800	19.2	8.6	48
14	Пресування олії	4950	19.8	8.9	49.5
15	Гранулювання комбікорму	5100	20.4	9.2	51
16	Пастеризація соку	5250	21	9.5	52.5
17	Стерилізація тари	5400	21.6	9.8	54
18	Миття обладнання	5550	22.2	10.1	55.5
19	Заморожування продукції	5700	22.8	10.4	57
20	Сушіння трав	5850	23.4	10.7	58.5

Контрольні питання

1. Сформулюйте загальну постановку задачі оптимізації енергоспоживання.
2. Які критерії оптимальності застосовуються в задачах енергозбереження?
3. Охарактеризуйте математичні методи розв'язання задач оптимізації енергоспоживання.
4. Як тарифна політика енергопостачання впливає на задачу оптимізації графіка навантаження?
5. У чому полягає задача пошуку балансу енергоефективності та витрат?
6. Як перевірити, що знайдена точка хопт дійсно є мінімумом функції сумарних витрат?
7. Як обчислюється економія витрат при переході від типового до оптимального режиму?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 9

Аналіз надійності енергоощадних технологічних систем та обладнання

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою розрахунку надійності системи з трьох послідовних елементів: обчислення загальної інтенсивності відмов, імовірності безвідмовної роботи системи, середнього напрацювання та показника очікуваного ризику.

Теоретичні відомості

Для системи з трьох послідовно з'єднаних елементів (наприклад, джерело – мережа – споживач) імовірність безвідмовної роботи всієї системи дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи кожного елемента. Комплексний аналіз включає розрахунок надійності системи в цілому та оцінку пов'язаного з нею економічного ризику.

Основні розрахункові формули

$$R_1(t)=e^{(-\lambda_1 \cdot t)}; R_2(t)=e^{(-\lambda_2 \cdot t)}; R_3(t)=e^{(-\lambda_3 \cdot t)} \quad (1)$$

де $R_1(t)$ - імовірність безвідмовної роботи кожного з трьох елементів системи окремо.

$$R_{\text{сист}}(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \quad (2)$$

де $R_{\text{сист}}(t)$ - імовірність безвідмовної роботи всієї послідовної системи.

$$\lambda_{\text{сист}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (3)$$

де $\lambda_{\text{сист}}$ - еквівалентна (сумарна) інтенсивність відмов системи (для експоненційного закону розподілу).

$$R_{\text{сист}}(t) = e^{(-\lambda_{\text{сист}} \cdot t)} \quad (4)$$

де $R_{\text{сист}}(t)$ - альтернативний (еквівалентний) спосіб обчислення надійності системи через сумарну інтенсивність відмов.

$$T_{\text{сер}} = 1/\lambda_{\text{сист}} \quad (5)$$

де $T_{\text{сер}}$ - середнє напрацювання системи на відмову.

$$P(\text{відмови}) = 1 - R_{\text{сист}}(t) \quad (6)$$

де $P(\text{відмови})$ - імовірність відмови системи за час t .

$$\text{Ризик} = P(\text{відмови}) \cdot V_{\text{наслідків}} \quad (7)$$

де Ризик - показник очікуваного ризику.

$$\text{Внесок}_i = \lambda_i / \lambda_{\text{сист}} \cdot 100\% \quad (8)$$

де Внесок_i - частка i -го елемента в сумарній інтенсивності відмов системи – визначає найслабшу ланку.

Приклад розрахунку

Система теплопостачання: $\lambda_1=0,0008$, $\lambda_2=0,0012$, $\lambda_3=0,0006$ год⁻¹. $t=300$ год, $V_{\text{наслідків}}=200$ тис. грн.

1) $\lambda_{\text{сист}}=0,0008+0,0012+0,0006=0,0026$ год⁻¹.

2) $R_{\text{сист}}(300)=e^{(-0,0026 \cdot 300)}=e^{(-0,78)}=0,458$.

3) $T_{\text{сер}}=1/0,0026=384,6$ год. 4) $P(\text{відмови})=1-0,458=0,542$.

5) $\text{Ризик}=0,542 \cdot 200=108,4$ тис. грн. 6) Внески: елемент 2 ($\lambda_2=0,0012$) дає $0,0012/0,0026 \cdot 100\%=46,2\%$ сумарної інтенсивності відмов – найслабша ланка системи.

Висновок: саме елемент 2 (найімовірніше, компресор чи котел) визначає основний ризик системи і має пріоритет при плануванні резервування чи модернізації.

Завдання для самостійного виконання

За заданими інтенсивностями відмов трьох послідовних елементів системи обчислити сумарну інтенсивність $\lambda_{\text{сист}}$, імовірність безвідмовної роботи $R_{\text{сист}}(t)$, середнє напрацювання $T_{\text{сер}}$, показник очікуваного ризику та частку кожного елемента у сумарній інтенсивності відмов. Визначити найслабшу ланку системи.

Вар.	Обладнання	λ_1 , год ⁻¹	λ_2 , год ⁻¹	λ_3 , год ⁻¹	t, год	$V_{\text{наслідків}}$, тис. грн
1	Лінія обробки зерна (котел+мережа+споживач)	0.0008	0.0012	0.0006	300	200
2	Холодильна станція (компресор+трубопровід+камера)	0.00084	0.00126	0.00063	315	212

Вар.	Обладнання	$\lambda 1, \text{год}^{-1}$	$\lambda 2, \text{год}^{-1}$	$\lambda 3, \text{год}^{-1}$	t, год	Vнаслідків, тис. грн
3	Котельня (пальник+теплообмінник+насос)	0.00088	0.00132	0.00066	330	224
4	Вентиляційна система	0.00092	0.00138	0.00069	345	236
5	Доїльна установка	0.00096	0.00144	0.00072	360	248
6	Кормовиробничий комплекс	0.001	0.0015	0.00075	375	260
7	Елеваторний комплекс	0.00104	0.00156	0.00078	390	272
8	Пастеризаційна лінія	0.00108	0.00162	0.00081	405	284
9	Компресорна станція	0.00112	0.00168	0.00084	420	296
10	Насосна станція	0.00116	0.00174	0.00087	435	308
11	Система водопостачання	0.0012	0.0018	0.0009	450	320
12	Сушильний комплекс	0.00124	0.00186	0.00093	465	332
13	Холодильний склад	0.00128	0.00192	0.00096	480	344
14	Лінія забою і переробки	0.00132	0.00198	0.00099	495	356
15	Молокопровід	0.00136	0.00204	0.00102	510	368
16	Система гноєвидалення	0.0014	0.0021	0.00105	525	380
17	Інкубаторна станція	0.00144	0.00216	0.00108	540	392
18	Зерноочисний комплекс	0.00148	0.00222	0.00111	555	404
19	Маслоцех	0.00152	0.00228	0.00114	570	416
20	Комбікормовий цех	0.00156	0.00234	0.00117	585	428

Контрольні питання

1. Дайте визначення надійності енергоощадної технологічної системи.

2. Які причини відмов і збоїв характерні для енергетичного обладнання?
3. Опишіть три періоди кривої життя інтенсивності відмов.
4. Як обчислюється показник очікуваного ризику енергетичної нестабільності?
5. Які методи застосовують для підвищення надійності енергетичного обладнання?
6. Як визначається імовірність безвідмовної роботи системи з послідовних елементів?
7. Як визначити найслабшу ланку послідовної системи за внеском у сумарну інтенсивність відмов?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 10

Розробка системи енергетичного аудиту технологічного процесу

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою статистичного контролю процесу: побудова контрольної карти Шухарта, обчислення індексу відтворюваності C_p та індексу налаштованості C_{pk} , аналіз стабільності процесу.

Теоретичні відомості

Контрольна карта Шухарта визначає межі допустимих коливань контрольованого параметра на основі середнього значення та розмаху вибірок. Індекс відтворюваності C_p характеризує потенційну здатність процесу відповідати межам допуску, а індекс C_{pk} додатково враховує зміщення середнього значення процесу відносно центру поля допуску.

Основні розрахункові формули

$$UCL = \bar{e} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (1)$$

де UCL - верхня контрольна межа; $A_2=0,58$ для вибірки $n=5$ (табличне значення).

$$LCL = \bar{e} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (2)$$

де LCL - нижня контрольна межа.

$$C_p = (USL - LSL)/(6\sigma) \quad (3)$$

де C_p - індекс відтворюваності процесу; USL , LSL – межі поля допуску.

$$C_{pu} = (USL - \bar{e})/(3\sigma) \quad (4)$$

де C_{pu} - односторонній індекс відтворюваності відносно верхньої межі.

$$C_{pl} = (\bar{e} - LSL)/(3\sigma) \quad (5)$$

де C_{pl} - односторонній індекс відтворюваності відносно нижньої межі.

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) \quad (6)$$

де C_{pk} - індекс налаштованості процесу, що враховує можливе зміщення середнього значення.

$$T_{ц} = (USL + LSL) / 2 \quad (7)$$

де $T_{ц}$ - центр поля допуску.

$$\text{Зміщення} = \bar{e} - T_{ц} \quad (8)$$

де Зміщення - зміщення - абсолютне зміщення середнього значення процесу відносно центру поля допуску.

Приклад розрахунку

$\bar{e}=40$, $\bar{R}=4,0$, $USL=46$, $LSL=34$, $\sigma=1,6$. $UCL=40+0,58 \cdot 4,0=42,3$. $LCL=40-2,3=37,7$.

$C_p=(46-34)/(6 \cdot 1,6)=12/9,6=1,25$ – процес потенційно здатний відповідати допуску ($C_p \geq 1,33$ бажано, тут дещо нижче ідеалу).

$C_{pu}=(46-40)/(3 \cdot 1,6)=6/4,8=1,25$. $C_{pl}=(40-34)/(3 \cdot 1,6)=6/4,8=1,25$. $C_{pk}=\min(1,25; 1,25)=1,25$.

$T_{ц}=(46+34)/2=40$. $\text{Зміщення}=40-40=0$ – процес центрований ($C_p=C_{pk}$, зміщення відсутнє).

Висновок: процес близький до задовільного рівня відтворюваності ($C_p=1,25$), центрований відносно поля допуску; для досягнення рекомендованого $C_p \geq 1,33$ необхідне подальше зниження варіативності σ .

Завдання для самостійного виконання

За заданими даними обчислити контрольні межі UCL/LCL ; обчислити індекси C_p , C_{pu} , C_{pl} , C_{pk} ; визначити зміщення середнього значення процесу відносно центру поля допуску. Зробити висновок про стабільність і центрованість процесу.

Варіант	Параметр контролю	$\bar{e} (\bar{X})$	$\bar{R}$	USL	LSL	σ
1	Питоме енергоспоживання лінії	40	4	46	34	1.6
2	Температура сушіння зерна	41.5	4.15	47.6	35.2	1.66

Варіант	Параметр контролю	$\bar{x} (\bar{X})$	$\bar{R}$	USL	LSL	σ
3	Питомі витрати палива котла	43	4.3	49.2	36.4	1.72
4	Питоме споживання компресора	44.5	4.45	50.8	37.6	1.78
5	Вологість продукту на виході	46	4.6	52.4	38.8	1.84
6	Температура пастеризації	47.5	4.75	54	40	1.9
7	Тиск у пневмосистемі	49	4.9	55.6	41.2	1.96
8	Витрата теплоносія	50.5	5.05	57.2	42.4	2.02
9	Температура охолодження	52	5.2	58.8	43.6	2.08
10	Питомі витрати електроенергії цеху	53.5	5.35	60.4	44.8	2.14
11	Концентрація розчину	55	5.5	62	46	2.2
12	Температура в холодильній камері	56.5	5.65	63.6	47.2	2.26
13	Витрата стисненого повітря	58	5.8	65.2	48.4	2.32
14	Питомі витрати газу	59.5	5.95	66.8	49.6	2.38
15	Температура в сушильній камері	61	6.1	68.4	50.8	2.44
16	Вологість готової продукції	62.5	6.25	70	52	2.5
17	Тиск пари в котлі	64	6.4	71.6	53.2	2.56
18	Питоме споживання насоса	65.5	6.55	73.2	54.4	2.62

Варіант	Параметр контролю	$\bar{x}$ ($\bar{X}$)	$\bar{R}$	USL	LSL	σ
19	Температура молока при охолодженні	67	6.7	74.8	55.6	2.68
20	Витрата води на миття	68.5	6.85	76.4	56.8	2.74

Контрольні питання

1. Що таке система енергетичного менеджменту і на яких принципах вона ґрунтується (цикл PDCA)?
2. Як обчислюються контрольні межі UCL/LCL контрольної карти?
3. Що показує індекс відтворюваності процесу C_p ?
4. Які коригувальні дії застосовуються за перевищення нормативного енергоспоживання?
5. Яку роль відіграє стандартизація процедур енергетичного аудиту (ISO 50002)?
6. У чому різниця між індексами C_p і C_{pk} ?
7. Що означає зміщення середнього значення процесу відносно центру поля допуску?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 11

Розробка інженерного рішення з підвищення енергоефективності виробничої системи

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою економічного обґрунтування енергоощадного рішення: розрахунок строку окупності, чистої приведеної вартості (NPV), внутрішньої норми дохідності (наближено) та індексу прибутковості проєкту.

Теоретичні відомості

Економічне обґрунтування енергоощадного рішення передбачає комплексний розрахунок кількох взаємопов'язаних показників: простого строку окупності, дисконтованих показників (NPV) з урахуванням вартості капіталу в часі, а також відносних показників ефективності інвестицій (індексу прибутковості).

Основні розрахункові формули

$$\text{Ток} = K / \Delta B \quad (1)$$

де Ток - простий строк окупності капітальних вкладень.

$$PVA(r,n) = (1 - (1+r)^{-n})/r \quad (2)$$

де $PVA(r,n)$ - коефіцієнт приведення анuitету (множник для дисконтування рівномірного грошового потоку).

$$NPV = \Delta B \cdot PVA(r,n) - K \quad (3)$$

де NPV - чиста приведена вартість проєкту за постійного щорічного грошового потоку ΔB .

$$PI = (NPV + K) / K \quad (4)$$

де PI - індекс прибутковості проєкту (Profitability Index).

$$\text{Ток.дисконт} = K / (\Delta B / (1+r/2)) \quad (5)$$

де Ток.дисконт - наближена оцінка дисконтованого строку окупності (спрощена поправка на вартість грошей у часі).

$$\text{Сумарний ефект} = \Delta B \cdot n - K \quad (6)$$

де Сумарний ефект - недисконтований сумарний ефект проєкту за n років.

$$IRR = r, \text{ за якого } NPV=0 \quad (7)$$

де $IRR = r$ - внутрішня норма дохідності – оцінюється підбором ставки r , за якої NPV звертається в нуль (орієнтовно, без точного розрахунку).

$$\text{Рентабельність річна} = \Delta B / K \cdot 100\% \quad (8)$$

де Рентабельність річна - проста річна рентабельність інвестиції.

Приклад розрахунку

$K=420$ тис. грн, $\Delta B=140$ тис. грн/рік, $r=15\%$, $n=7$ років.

1) $T_{ок}=420/140=3,0$ роки.

2) $PVA(15\%;7)=(1-1,15^{(-7)})/0,15=4,16$.

3) $NPV=140 \cdot 4,16 - 420 = 582,9 - 420 = 162,9$ тис. грн.

4) $PI=(162,9+420)/420=1,388$ – на кожну гривню вкладень проєкт дає 1,388 грн приведеної вартості.

5) Сумарний недисконтований ефект $=140 \cdot 7 - 420 = 980 - 420 = 560$ тис. грн.

6) Рентабельність річна $=140/420 \cdot 100\% = 33,3\%$.

Висновок: проєкт економічно доцільний ($NPV>0$, $PI>1$), із помірним строком окупності 3 роки та високою річною рентабельністю.

Завдання для самостійного виконання

За заданими капітальними вкладеннями, річною економією, ставкою дисконтування та горизонтом розрахунку обчислити Ток, $PVA(r,n)$, NPV , індекс прибутковості PI , сумарний недисконтований ефект та просту річну рентабельність. Зробити висновок про економічну доцільність проєкту.

Варіант	Захід	К, тис. грн	ΔB , тис. грн/рік	r, %	n, років
1	Рекуперація тепла вентвипусків	300	100	14	6

Варіант	Захід	К, тис. грн	ΔВ, тис. грн/рік	г, %	п, років
2	Частотне регулювання насосної станції	325	108	14.5	7
3	Модернізація теплоізоляції котельні	350	116	15	8
4	Встановлення економайзера котла	375	124	15.5	9
5	Заміна освітлення на світлодіодне	400	132	16	10
6	Впровадження теплового насоса	425	140	16.5	11
7	Модернізація холодильної станції	450	148	17	12
8	Автоматизація регулювання опалення	475	156	17.5	13
9	Встановлення сонячних панелей	500	164	18	14
10	Модернізація компресорної станції	525	172	18.5	15
11	Впровадження когенераційної установки	550	180	19	16
12	Заміна електродвигунів на ІЕЗ	575	188	19.5	17
13	Утеплення огорожувальних конструкцій	600	196	20	18
14	Модернізація системи вентиляції	625	204	20.5	19

Варіант	Захід	К, тис. грн	ΔB , тис. грн/рік	r, %	n, років
15	Встановлення частотних перетворювачів	650	212	21	20
16	Реконструкція теплових мереж	675	220	21.5	21
17	Впровадження системи моніторингу	700	228	22	22
18	Модернізація сушильного комплексу	725	236	22.5	23
19	Встановлення рекуператора пари	750	244	23	24
20	Автоматизація кормороздавання	775	252	23.5	25

Контрольні питання

1. Перелічіть основні етапи інженерного проектування енергоощадних рішень.
2. Як обчислюється строк окупності капітальних вкладень в енергоощадний захід?
3. Що таке чиста приведена вартість (NPV) проєкту?
4. Які критерії застосовуються для аналізу альтернативних енергоощадних варіантів?
5. Наведіть приклади інноваційних підходів до підвищення енергоефективності (когенерація, теплові насоси).
6. Що показує індекс прибутковості проєкту (PI)?
7. Чим відрізняється простий строк окупності від дисконтованого?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 12

Проектування енергоощадного обладнання переробних підприємств

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою теплотехнічного розрахунку двошарової огорожувальної конструкції: обчислення термічних опорів шарів, загального коефіцієнта теплопередачі, теплового потоку та річних теплових втрат.

Теоретичні відомості

Тепловий потік через багатошарову огорожувальну конструкцію визначається сумарним термічним опором усіх шарів та коефіцієнтів тепловіддачі поверхонь. Комплексний розрахунок дає змогу обчислити не лише миттєвий тепловий потік, а й річні витрати енергії на компенсацію теплових втрат.

Основні розрахункові формули

$$R_1 = \delta_1/\lambda_1; R_2 = \delta_2/\lambda_2 \quad (1)$$

де R_1 - термічні опори першого та другого шарів конструкції.

$$\Sigma R = R_1 + R_2 \quad (2)$$

де ΣR - сумарний термічний опір конструкції.

$$k = 1/(1/\alpha_1 + \Sigma R + 1/\alpha_2) \quad (3)$$

де k - коефіцієнт теплопередачі конструкції.

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \quad (4)$$

де Q - тепловий потік через конструкцію.

$$R_0 = 1/\alpha_1 + \Sigma R + 1/\alpha_2 \quad (5)$$

де R_0 - повний термічний опір конструкції (обернений до k).

$$W_{\text{рік}} = Q \cdot 8760/1000 \quad (6)$$

де $W_{\text{рік}}$ - орієнтовні річні теплові втрати через конструкцію за цілорічної експлуатації, МВт·год (спрощено, без урахування сезонності).

$$V_{\text{втр}} = W_{\text{рік}} \cdot \Pi \quad (7)$$

де $V_{\text{втр}}$ - вартість річних теплових втрат; Π – тариф на теплову енергію, приймати 1,8 тис. грн/МВт·год для орієнтовного розрахунку.

$$\Delta Q(\delta_2^{\text{доп}}) = k' \cdot F \cdot \Delta t - Q \quad (8)$$

де $\Delta Q(\delta_2^{\text{доп}})$ - зниження теплового потоку при збільшенні товщини другого шару на 50% (k' обчислюється аналогічно з новим $R_2' = 1,5 \cdot R_2$).

Приклад розрахунку

$\delta_1 = 100$ мм, $\lambda_1 = 0,045$ Вт/(м·К); $\delta_2 = 10$ мм (метал), $\lambda_2 = 46,5$ Вт/(м·К); $\alpha_1 = 8$, $\alpha_2 = 20$ Вт/(м²·К); $F = 40$ м², $\Delta t = 45$ К.

1) $R_1 = 0,1/0,045 = 2,222$; $R_2 = 0,01/46,5 = 0,00022$ (практично нехтовний опір металевому шару). $\Sigma R = 2,222$.

2) $k = 1/(1/8 + 2,222 + 1/20) = 1/(0,125 + 2,222 + 0,05) = 1/2,397 = 0,417$ Вт/(м²·К).

3) $Q = 0,417 \cdot 40 \cdot 45 = 750,6$ Вт.

4) $W_{\text{рік}} = 750,6 \cdot 8760/1000 = 6575$ МВт·год (умовне значення для орієнтовного розрахунку, без урахування сезонності роботи).

5) $V_{\text{втр}} = 6575 \cdot 1,8 = 11835$ тис. грн (умовна оцінка для цілорічної роботи) – насправді розрахунок слід коригувати на фактичну тривалість опалювального періоду.

Завдання для самостійного виконання

За заданими параметрами двошарової конструкції обчислити термічні опори шарів, коефіцієнт теплопередачі k , тепловий потік Q ; оцінити орієнтовні річні теплові втрати $W_{\text{рік}}$ та їх вартість $V_{\text{втр}}$ за наведеним тарифом; обчислити зменшення теплового потоку при збільшенні товщини теплоізоляційного шару на 50%.

Варіант	Конструкція	δ_1 , мм; λ_1	δ_2 , мм; λ_2	α_1, α_2	F , м²; Δt , К
1	Стіна сушильної камери	100;0,045	10;46,5	8;20	40;45
2	Стіна холодильної камери	120;0,035	8;50	7;18	60;25

Варіант	Конструкція	$\delta 1, \text{мм}; \lambda 1$	$\delta 2, \text{мм}; \lambda 2$	$\alpha 1, \alpha 2$	$F, \text{м}^2; \Delta t, \text{К}$
3	Дах тваринницького приміщення	150;0,040	12;45	9;22	300;30
4	Ізоляція труб теплотраси	80;0,038	6;40	8;20	20;60
5	Стіна котельні	110;0,042	10;46	7;19	50;35
6	Стіна пастеризаційного цеху	90;0,036	9;45	8;21	35;40
7	Дах складу зберігання	130;0,044	11;50	9;20	45;30
8	Ізоляція резервуара	70;0,033	5;40	6;18	25;55
9	Стіна морозильної камери	140;0,041	10;46	8;22	55;28
10	Стіна цеху переробки	100;0,037	8;45	7;20	30;45
11	Перекриття виробничого цеху	95;0,039	9;46	8;19	38;38
12	Стіна теплиці	115;0,043	10;50	9;21	48;32
13	Ізоляція паропроводу	85;0,034	6;42	7;18	28;50
14	Стіна елеватора	125;0,046	11;45	8;22	42;35
15	Дах сушильного комплексу	105;0,040	10;46	8;20	36;40
16	Ізоляція трубопроводу гарячої води	75;0,032	5;40	6;19	22;58
17	Стіна цеху молокопереробки	135;0,045	12;50	9;21	46;30
18	Дах пташника	98;0,038	9;46	7;20	32;42
19	Стіна свинарника	112;0,041	10;45	8;19	40;36
20	Ізоляція бака-накопичувача	88;0,036	7;42	7;18	26;50

Контрольні питання

1. Сформулюйте основні принципи конструювання енергоощадного обладнання.
2. Наведіть класифікацію енергоефективних робочих органів обладнання АПВ.
3. Як обчислюється коефіцієнт теплопередачі багат шарової конструкції?
4. Що таке «місток холоду» і як його уникають при проектуванні?
5. Якими теплофізичними властивостями визначається вибір матеріалу для енергоощадного обладнання?
6. Як термічний опір шару матеріалу залежить від його товщини та коефіцієнта теплопровідності?
7. Як оцінити економічний ефект від збільшення товщини теплоізоляційного шару?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 13

Розрахунок енергетичного балансу технологічного обладнання

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою складання й перевірки енергетичного балансу теплотехнічної установки з трьома статтями втрат, обчислення ККД та структурного аналізу втрат.

Теоретичні відомості

Енергетичний баланс установки – рівність між підведеною енергією та сумою корисно використаної енергії й усіх статей втрат. Структурний аналіз втрат (за їх відносною часткою) дає змогу визначити пріоритетний напрям підвищення ефективності установки.

Основні розрахункові формули

$$\Sigma Q_{\text{втр}} = Q_{\text{втр}1} + Q_{\text{втр}2} + Q_{\text{втр}3} \quad (1)$$

де $\Sigma Q_{\text{втр}}$ - сумарні втрати енергії установки.

$$Q_{\text{баланс}} = Q_{\text{кор}} + \Sigma Q_{\text{втр}} \quad (2)$$

де $Q_{\text{баланс}}$ - перевірка балансу; повинно дорівнювати $Q_{\text{підв}}$ (з допустимою похибкою).

$$\text{Похибка} = (Q_{\text{підв}} - Q_{\text{баланс}}) / Q_{\text{підв}} \cdot 100\% \quad (3)$$

де Похибка - відносна похибка балансу (нев'язка), у нормі не повинна перевищувати кількох відсотків.

$$\eta = Q_{\text{кор}} / Q_{\text{підв}} \cdot 100\% \quad (4)$$

де η - ККД установки.

$$d_i = Q_{\text{втр}i} / \Sigma Q_{\text{втр}} \cdot 100\% \quad (5)$$

де d_i - частка i -ї статті втрат у загальній сумі втрат.

$$d'i = Q_{\text{втр}i} / Q_{\text{підв}} \cdot 100\% \quad (6)$$

де $d'i$ - частка i -ї статті втрат відносно підведеної енергії.

$$\eta_{\text{пот}} = (Q_{\text{підв}} - \max(Q_{\text{втр}i})) / Q_{\text{підв}} \cdot 100\% \quad (7)$$

де $\eta_{\text{пот}}$ - потенційний ККД за умови повного усунення найбільшої статті втрат.

$$\text{Приріст } \eta = \eta_{\text{пот}} - \eta \quad (8)$$

де Приріст η - очікуваний приріст ККД при усуненні найбільшої статті втрат.

Приклад розрахунку

$Q_{\text{підв}}=1000$ кВт, $Q_{\text{кор}}=780$ кВт, $Q_{\text{втр1(гази)}}=130$,
 $Q_{\text{втр2(обмурівка)}}=55$, $Q_{\text{втр3(продувка)}}=25$ кВт.

1) $\Sigma Q_{\text{втр}}=130+55+25=210$.

2) $Q_{\text{баланс}}=780+210=990$.

Похибка= $(1000-990)/1000 \cdot 100\%=1,0\%$ – прийнятна нев'язка балансу.

3) $\eta=780/1000 \cdot 100\%=78\%$.

4) Частки: $d_1=130/210 \cdot 100\%=61,9\%$; $d_2=55/210 \cdot 100\%=26,2\%$;
 $d_3=25/210 \cdot 100\%=11,9\%$.

5) Відносно підведеної: $d'_1=13\%$; $d'_2=5,5\%$; $d'_3=2,5\%$.

6) Найбільша стаття втрат – гази ($Q_{\text{втр1}}=130$ кВт).

7) $\eta_{\text{пот}}=(1000-130)/1000 \cdot 100\%=87\%$ (за умови повного усунення втрат з газами, що нереалістично, але дає верхню межу потенціалу). Приріст $\eta=87-78=9$ в. п. – обґрунтовує пріоритетність встановлення економайзера.

Завдання для самостійного виконання

За заданими складовими енергетичного балансу перевірити баланс (обчислити похибку), обчислити ККД установки η , структуру часток втрат d_i та d'_i ; визначити найбільшу статтю втрат і обчислити потенційний приріст ККД при її повному усуненні.

Варіант	Установка	$Q_{\text{підв}}$, кВт	$Q_{\text{кор}}$, кВт	$Q_{\text{втр1}}$, кВт	$Q_{\text{втр2}}$, кВт	$Q_{\text{втр3}}$, кВт
1	Паровий котел	1000	780	130	55	25
2	Зерносушарка	1060	825	138	58	26.5
3	Пастеризатор	1120	870	146	61	28
4	Холодильна установка	1180	915	154	64	29.5
5	Водогрійний котел	1240	960	162	67	31
6	Випарна установка	1300	1005	170	70	32.5
7	Сушильна камера	1360	1050	178	73	34

Варіант	Установка	Qпідв, кВт	Qкор, кВт	Qвтр1, кВт	Qвтр2, кВт	Qвтр3, кВт
8	Теплообмінник молочної лінії	1420	1095	186	76	35.5
9	Автоклав	1480	1140	194	79	37
10	Конвективна сушарка	1540	1185	202	82	38.5
11	Компресорна станція	1600	1230	210	85	40
12	Стерилізатор	1660	1275	218	88	41.5
13	Дистиляційна установка	1720	1320	226	91	43
14	Гомогенізатор	1780	1365	234	94	44.5
15	Пресова установка	1840	1410	242	97	46
16	Ферментатор	1900	1455	250	100	47.5
17	Охолоджувач молока	1960	1500	258	103	49
18	Термокамера	2020	1545	266	106	50.5
19	Бродильний апарат	2080	1590	274	109	52
20	Екстрактор	2140	1635	282	112	53.5

Контрольні питання

1. Що таке енергетичний баланс установки і як він розраховується?
2. Як обчислюється ККД установки за результатами енергетичного балансу?
3. Які основні статті втрат характерні для теплового обладнання?
4. Які можливості надає CFD-моделювання для аналізу енергетичних процесів?
5. Чому важливо перевіряти баланс (рівність підведеної енергії сумі складових)?
6. Як визначається потенційний ККД установки за умови усунення найбільшої статті втрат?
7. Яка допустима похибка (нев'язка) енергетичного балансу вважається прийнятною?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 14

Аналіз експлуатаційних даних для підвищення енергоефективності обладнання

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою прогнозування зростання питомих витрат енергії обладнання, визначення рекомендованої періодичності обслуговування та оцінки ймовірності відмови за розподілом Вейбулла.

Теоретичні відомості

Лінійна модель $\Delta e(t) = e_0 + k \cdot t$ описує поступове зростання питомих витрат енергії обладнання між плановими обслуговуваннями. Розподіл Вейбулла $F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta}$ використовується для оцінювання ймовірності відмови обладнання залежно від напрацювання.

Основні розрахункові формули

$$\Delta e(t) = e_0 + k \cdot t \quad (1)$$

де $\Delta e(t)$ - питомі витрати енергії через t місяців після обслуговування.

$$\text{ПриростВІДН}(t) = (\Delta e(t) - e_0) / e_0 \cdot 100\% \quad (2)$$

де $\text{ПриростВІДН}(t)$ - відносний приріст питомих витрат за час t .

$$t^* : e_0 + k \cdot t^* = e_0 \cdot (1 + \text{Поріг} / 100) \quad (3)$$

де t^* - рекомендований інтервал обслуговування (час досягнення допустимого порогу зростання).

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (4)$$

де $F(t)$ - функція розподілу Вейбулла (ймовірність відмови до напрацювання t).

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (5)$$

де $R(t)$ - імовірність безвідмовної роботи за розподілом Вейбулла.

$$T_{\text{сер}} = \eta \cdot \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (6)$$

де $T_{\text{сер}}$ - середнє напрацювання до відмови (Γ – гамма-функція; для орієнтовного розрахунку приймати $\Gamma(1 + 1/\beta) = 0,90$ за $\beta = 1,6 \dots 2,0$).

$$\lambda(t) = (\beta/\eta) \cdot (t/\eta)^{(\beta-1)} \quad (7)$$

де $\lambda(t)$ - інтенсивність відмов у момент часу t (зростаюча за $\beta > 1$, що відповідає зношуванню).

$$F(t^*) \quad (8)$$

де $F(t^*)$ - імовірність відмови обладнання до моменту рекомендованого обслуговування t^* – орієнтир для оцінки ризику несвоєчасної заміни.

Приклад розрахунку

$e_0 = 15$ кВт·год/т, $k = 0,3$ кВт·год/(т·міс), поріг = 12%. $\eta = 500$ год, $\beta = 1,6$.

1) t^* : $15 + 0,3t^* = 15 \cdot 1,12 = 16,8 \rightarrow 0,3t^* = 1,8 \rightarrow t^* = 6$ місяців – рекомендована періодичність обслуговування.

2) $F(500) = 1 - e^{-(500/500)^{1,6}} = 1 - e^{-1} = 1 - 0,368 = 0,632$ – ймовірність відмови до напрацювання 500 год становить 63,2%.

3) $T_{сер} = 500 \cdot 0,90 = 450$ год (орієнтовна оцінка). 4) $\lambda(500) = (1,6/500) \cdot (500/500)^{0,6} = 0,0032 \cdot 1 = 0,0032$ год⁻¹ – інтенсивність відмов на момент $t = \eta$.

Висновок: рекомендована періодичність технічного обслуговування – 6 місяців; висока ймовірність відмови (63,2%) до напрацювання 500 год підтверджує доцільність планового обслуговування задовго до цього напрацювання.

Завдання для самостійного виконання

За заданими параметрами моделі зростання питомих витрат обчислити рекомендовану періодичність обслуговування t^* ; за параметрами розподілу Вейбулла обчислити $F(\eta)$, $R(\eta)$, середнє напрацювання $T_{сер}$ та інтенсивність відмов $\lambda(\eta)$. Зробити висновок про співвідношення рекомендованої періодичності обслуговування й імовірності відмови обладнання.

Варіант	Обладнання	e_0 , кВт·год/т	k , кВт·год/(т·міс)	Поріг, %	η , параметр Вейбулла	β , параметр Вейбулла
1	Пастеризатор	15	0.3	12	500	1.6

Варіант	Обладнання	e_0 , кВт·год/т	k, кВт·год/(т·міс)	Поріг, %	η , параметр Вейбулла	β , параметр Вейбулла
2	Компресор холодильної установки	16	0.33	13	525	1.68
3	Котел	17	0.36	14	550	1.76
4	Теплообмінник молочної лінії	18	0.39	15	575	1.84
5	Насос оборотного водопостачання	19	0.42	16	600	1.92
6	Вентилятор зернохосовища	20	0.45	17	625	2
7	Сушарка	21	0.48	18	650	2.08
8	Гомогенізатор	22	0.51	19	675	2.16
9	Сепаратор	23	0.54	20	700	2.24
10	Прес маслоцеху	24	0.57	21	725	2.32
11	Дробарка кормів	25	0.6	22	750	2.4
12	Автоклав	26	0.63	23	775	2.48
13	Стерилізатор	27	0.66	24	800	2.56
14	Випарна установка	28	0.69	25	825	2.64
15	Охолоджувач молока	29	0.72	26	850	2.72
16	Транспортер	30	0.75	27	875	2.8
17	Змішувач кормів	31	0.78	28	900	2.88
18	Елеватор	32	0.81	29	925	2.96
19	Кормороздавач	33	0.84	30	950	3.04
20	Аератор	34	0.87	31	975	3.12

Контрольні питання

1. Які джерела даних використовують для аналізу експлуатаційного енергоспоживання обладнання?

2. Якими методами виявляють джерела підвищених втрат енергії в обладнанні?
3. Як застосовується розподіл Вейбулла для оцінювання ресурсу енергетичного обладнання?
4. Як на основі моделі зростання питомих витрат обґрунтовується періодичність обслуговування?
5. Які заходи сприяють підвищенню енергоефективного ресурсу обладнання?
6. Що означає параметр форми β розподілу Вейбулла і як він впливає на характер відмов?
7. Як пов'язані рекомендована періодичність обслуговування та ймовірність відмови обладнання?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 15

Обґрунтування використання відновлюваних джерел енергії на підприємстві

Мета роботи

Оволодіти комплексною методикою розрахунку біогазової енергетичної установки: вихід біогазу, обсяг виробленої електричної та теплової енергії когенераційною установкою, коефіцієнт енергетичної автономності та економічний ефект.

Теоретичні відомості

Комплексний розрахунок біогазової установки охоплює визначення виходу біогазу з органічної сировини, обчислення виробленої електричної та супутньої теплової енергії когенераційною установкою, а також оцінку коефіцієнта енергетичної автономності підприємства й економічного ефекту від заміщення традиційних джерел.

Основні розрахункові формули

$$V_{\text{біогазу}} = m \cdot b \quad (1)$$

де $V_{\text{біогазу}}$ - добовий вихід біогазу; m – маса сухої органічної речовини, кг/добу; b – питомий вихід біогазу, $\text{м}^3/\text{кг}$.

$$E_{\text{тепл підв}} = V_{\text{біогазу}} \cdot Q_{\text{н}} \quad (2)$$

де $E_{\text{тепл підв}}$ - повна теплотворна енергія добового обсягу біогазу, МДж/добу.

$$E_{\text{е}} = E_{\text{тепл підв}} \cdot \eta_{\text{е}} \quad (3)$$

де $E_{\text{тепл підв}}$ - обсяг виробленої електроенергії когенераційною установкою, МДж/добу.

$$E_{\text{е}}(\text{кВт} \cdot \text{год}) = E_{\text{е}} / 3,6 \quad (4)$$

де $E_{\text{е}}(\text{кВт} \cdot \text{год})$ - переведення обсягу електроенергії з МДж у кВт·год.

$$Q_{\text{супутня}} = E_{\text{тепл підв}} \cdot (1 - \eta_{\text{е}}) \cdot \eta_{\text{т}} \quad (5)$$

де $Q_{\text{супутня}}$ - обсяг корисної супутньої теплоти когенерації; $\eta_{\text{т}}$ – коефіцієнт використання скидної теплоти (приймати 0,45 для орієнтовного розрахунку).

$$K_a = E_e(\text{кВт}\cdot\text{год}) / E_{\text{заг}} \quad (6)$$

де K_a - коефіцієнт енергетичної автономності підприємства за електроенергією.

$$E_{\text{дефіцит}} = E_{\text{заг}} - E_e(\text{кВт}\cdot\text{год}) \quad (7)$$

де $E_{\text{дефіцит}}$ - залишковий дефіцит електроенергії, що покривається з традиційних джерел.

$$V_{\text{екон}} = E_e(\text{кВт}\cdot\text{год}) \cdot \Pi \quad (8)$$

де $V_{\text{екон}}$ - вартісна оцінка заміщеної електроенергії; Π – тариф на електроенергію, приймати 4,5 грн/кВт·год для орієнтовного розрахунку.

Приклад розрахунку

$m=7000$ кг/добу, $b=0,28$ м³/кг, $Q_H=21$ МДж/м³, $\eta_e=36\%$, $E_{\text{заг}}=6500$ кВт·год/добу.

1) $V_{\text{біогазу}}=7000 \cdot 0,28=1960$ м³/добу.

2) $E_{\text{тепл підв}}=1960 \cdot 21=41160$ МДж/добу.

3) $E_e=41160 \cdot 0,36=14818$ МДж/добу.

4) $E_e(\text{кВт}\cdot\text{год})=14818/3,6=4116$ кВт·год/добу.

5) $K_a=4116/6500=0,633$ – установка покриває 63,3% потреби підприємства в електроенергії.

6) $E_{\text{дефіцит}}=6500-4116=2384$ кВт·год/добу – залишковий обсяг, що постачається з мережі.

7) $V_{\text{екон}}=4116 \cdot 4,5=18522$ грн/добу – вартість заміщеної електроенергії.

Завдання для самостійного виконання

За заданими масою сировини, питомим виходом біогазу та теплотехнічними параметрами обчислити добовий вихід біогазу, обсяг виробленої електроенергії E_e , коефіцієнт енергетичної автономності K_a , залишковий дефіцит електроенергії та вартісну оцінку заміщеної електроенергії. Зробити висновок про доцільність впровадження установки.

Варіант	Підприємство	m, кг/добу	b, м³/кг	Qн, МДж/м³	ηе, %	Езаг, кВт·год/добу
1	Тваринницький комплекс (ВРХ)	7000	0.28	21	36	6500
2	Свинокомплекс	7350	0.295	21.4	37.2	6750
3	Птахофабрика	7700	0.31	21.8	38.4	7000
4	Молочна ферма	8050	0.325	22.2	39.6	7250
5	Комплекс ВРХ м'ясного напрямку	8400	0.34	22.6	40.8	7500
6	Вівцеферма	8750	0.355	23	42	7750
7	Козоферма	9100	0.37	23.4	43.2	8000
8	Комбінований тваринницький комплекс	9450	0.385	23.8	44.4	8250
9	Кролеферма	9800	0.4	24.2	45.6	8500
10	Страусина ферма	10150	0.415	24.6	46.8	8750
11	Комплекс відгодівлі ВРХ	10500	0.43	25	48	9000
12	Молочно-товарна ферма	10850	0.445	25.4	49.2	9250
13	Свиноферма товарна	11200	0.46	25.8	50.4	9500
14	Птахокомплекс яєчного напрямку	11550	0.475	26.2	51.6	9750
15	М'ясо-молочний комплекс	11900	0.49	26.6	52.8	10000
16	Тепличний комбінат (з біогазом)	12250	0.505	27	54	10250
17	Переробний комплекс з тваринництвом	12600	0.52	27.4	55.2	10500

Варіант	Підприємство	m, кг/добу	b, м³/кг	Qн, МДж/м³	ηе, %	Езаг, кВт·год/добу
18	Агрохолдинг (тваринницький підрозділ)	12950	0.535	27.8	56.4	10750
19	Ферма органічного тваринництва	13300	0.55	28.2	57.6	11000
20	Комплекс з переробки гною	13650	0.565	28.6	58.8	11250

Контрольні питання

1. Які відновлювані джерела енергії доцільно використовувати на переробних і тваринницьких підприємствах?
2. Від яких факторів залежить питомий вихід біогазу?
3. Як обчислюється обсяг електроенергії, виробленої когенераційною установкою?
4. Що таке коефіцієнт енергетичної автономності підприємства?
5. Чому навіть за високого коефіцієнта автономності підприємству потрібен резерв традиційних джерел енергії?
6. Як обчислюється обсяг супутньої корисної теплоти когенераційної установки?
7. Як оцінити вартісний ефект від заміщення традиційної електроенергії власною генерацією?

Список використаних джерел

1. Зубко В. М. Агроінжиніринг : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти спеціальностей 208 «Агроінженерія», 202 «Агрономія». Суми : СНАУ, 2022. 468 с.
2. Надійність машин та обладнання. Частина 1. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання : навч. посібник / А. В. Новицький та ін. Київ : НУБіП, 2023. 209 с.
3. Мигаль В. Д., Шуляк М. Л., Шевченко І. О. Інтелектуальні системи тракторів і автомобілів, сервісний супровід : підручник. Харків : ДБТУ ; Майдан, 2023. 246 с.
4. Лебедев А. Т., Шуляк М. Л., Зубко В. М., Лебедев С. А. Будова тракторів John Deere серії 6, 8, 9 : підручник для здобувачів освіти зі спеціальності 208 «Агроінженерія», за ред. А.Т. Лебедева. Суми :СНАУ, 2024. 210 с.
5. Конструкції і розрахунки машин та апаратів переробних виробництв : підручник / В. С. Бойко та ін. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет ім. Дмитра Моторного, 2021. 308 с.
6. Бабенко Д. В., Доценко Н. А., Горбенко О. А. Дослідження конструктивних і кінематичних характеристик енергоефективного олійного пресу. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2024. Вип. 28(3). С. 41-54. DOI: 10.56407/bs.agrarian/3.2024.41
7. Бабенко Д. В., Доценко Н. А., Горбенко О. А., Бацуровська І. В. Дослідження характеру руху подрібненої маси по поверхні решіт сепаратора насіння овочевих та баштанних культур. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2023. Вип. 27(4). С. 18-35. DOI: <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/4.2023.18>.
8. Технологія викладання загальнотехнічних дисциплін в умовах цифрового навчального середовища аграрних закладів вищої освіти: монографія / Д. В. Бабенко, Н. А. Доценко, О. А. Горбенко та ін. Миколаїв : МНАУ, 2025. 280 с. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/20871>.
9. Babenko D., Baczurovskaya I., Gorbenko O. Determination of the parameters of the use of water-lifting equipment in the conditions of livestock farms. *Ukrainian black sea region agrarian science*. 2022. Vol. 26, no. 3. URL: [https://doi.org/10.56407/2313-092x/2022-26\(3\)-3](https://doi.org/10.56407/2313-092x/2022-26(3)-3).
10. Babenko D., Dotsenko N., Gorbenko O. Justification of the design parameters of improved equipment for tomato processing. *Ukrainian Black Sea region agrarian science*. 2025. Vol. 29, no. 3. P. 9–22. URL: <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/3.2025.09>.

Навчальне видання

**Енергоефективні та ресурсощадні технології переробних і
тваринницьких підприємств:
методичні рекомендації для виконання практичних робіт**

Укладач: **Горбенко** Олена Андріївна

Редактор: О. А. Горбенко

Комп'ютерний набір: О. А. Горбенко

Дизайн і верстка: О. А. Горбенко

Формат 60х84/16. Ум. друк. арк. 3,87

Тираж 15 прим. Зам. №

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету.
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9