

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

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В АПК

метод. реком. для виконання практ. робіт здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв
2026

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 17.03.2026, протокол № 6

Укладачі:

Мартиненко Володимир Олександрович - кандидат технічних наук, доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки;

Рецензенти:

Садовий О.С. – завідувач кафедри агроінженерії, кандидат технічних наук, доцент;

Рябенський В.М. – завідувач кафедри програмована електроніка, електротехніка і телекомунікації професор, доктр. тех. наук, Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова.

технологічних процесах сільськогосподарського виробництва.....	6
1.2. Способи і пристрої перетворення електричної енергії в теплову.....	9
1.3. Електричні нагрівання опором.....	12
1.4. Побічне нагрівання опором.....	16
1.5. Електричні водонагрівачі.....	20
1.6. Електротермічне обладнання систем мікроклімату в спорудах захищеного ґрунту.....	24
1.7. Електронагрівальні установки для теплової обробки і сушіння с.-г. продуктів і кормів.....	28
1.8. Електричні холодильні машини і теплові насоси.....	32
Модуль 2. Електротехнологічні установки.....	37
2.1. Електротермічне обладнання ремонтних підприємств.....	37
2.2. Побутові електронагрівальні прилади.....	41
2.3. Основи електронно-іонної технології.....	45
2.4. Електричні іонізатори повітря та обробка електричним струмом.....	49
2.5. Електроімпульсна техніка і технологія.....	53
2.6. Ультразвукова техніка і технологія.....	56
2.7. Магнітна обробка матеріалів.....	60

(бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Їх метою є формування у здобувачів практичних умінь і навичок з аналізу, розрахунку, вибору та оцінювання ефективності електротехнологічного обладнання, що застосовується в агропромисловому комплексі. Зміст рекомендацій відповідає тематиці дисципліни та охоплює основні напрями використання електричної енергії у теплових і технологічних процесах сільськогосподарського виробництва.

У сучасних умовах електротехнології є важливою складовою технічного забезпечення АПК, оскільки дають змогу підвищувати продуктивність технологічних процесів, покращувати якість продукції, забезпечувати необхідні параметри мікроклімату, знижувати питомі витрати енергії та створювати передумови для автоматизації виробництва. Особливого значення набувають питання раціонального використання електроенергії, вибору енергоощадних режимів роботи установок, а також техніко-економічного обґрунтування застосування електронагрівальних, електродних, електрокалориферних, електроімпульсних, ультразвукових та інших електротехнологічних систем.

Методичні рекомендації структуровано за двома модулями. Перший модуль присвячено електронагрівальним установкам і включає практичні роботи з розрахунку потужності, параметрів нагрівальних елементів, електродних водонагрівачів, електрокалориферних установок, водонагрівачів, а також обладнання для теплової обробки, сушіння, холодильних машин і теплових насосів. Другий модуль охоплює електротехнологічні установки, зокрема електротермічне обладнання, побутові електронагрівальні прилади, електронно-іонні технології, іонізатори повітря, електроімпульсну, ультразвукову та магнітну обробку матеріалів. Така побудова забезпечує послідовний перехід від засвоєння базових закономірностей електронагрівання до розв'язання прикладних інженерних задач у сфері аграрного виробництва.

Кожна практична робота містить чітко сформульовані завдання, необхідні короткі теоретичні відомості, зразок виконання розрахунків та варіанти вихідних

дисципліни, розвитку інженерного мислення та набуттю фахових навичок, необхідних майбутньому бакалавру для розв'язання виробничих завдань у галузі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки аграрного спрямування.

ЗАВДАННЯ

1. Визначити встановлену (приєднану) потужність електронагрівальної установки для нагрівання технологічного матеріалу (вода, молоко, корм) за варіантом вихідних даних.
2. Визначити річну витрату електроенергії при роботі установки у нічному тарифному режимі (8 год/добу, 300 робочих днів на рік).
3. Розрахувати вартість спожитої електроенергії за нічним і денним тарифами та визначити економію від роботи в нічний час.
4. Зробити висновок про доцільність переведення установки на нічний режим роботи.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електронагрівальна установка (ЕНУ) - це пристрій, що перетворює електричну енергію в теплову для виконання технологічного процесу. Розрізняють ЕНУ прямого нагрівання (теплота виділяється безпосередньо в речовині: електродні, контактні) і непрямого нагрівання (теплота виділяється в нагрівнику і передається речовині: елементні, індукційні, діелектричні). ЕНУ прямого нагрівання мають вищий тепловий ККД завдяки відсутності проміжних теплових опорів.

Встановлена потужність ЕНУ визначається з рівняння теплового балансу. Для установок ПЕРІОДИЧНОЇ дії (садочні, ємнісні - нагрів партії матеріалу за час T):

$$P_{\nu} = k_3 \cdot m \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1) / (3600 \cdot T \cdot \eta_{заг}), \text{ кВт}$$

де G - масова продуктивність, кг/год. Загальний ККД установки: $\eta_{заг} = \eta_{тепл} \cdot \eta_{ел}$, де $\eta_{тепл}$ - тепловий ККД (враховує теплові втрати через стінки і нагрівання конструкції); $\eta_{ел}$ - електричний ККД (для елементних нагрівачів опором $\eta_{ел} = 1,0$).

Річна витрата електроенергії при роботі з постійною потужністю: $W = P_y \cdot t_{доб} \cdot N_{рік}$, кВт·год, де $t_{доб}$ - час роботи на добу, год; $N_{рік}$ - кількість робочих діб на рік. Тарифи на електроенергію в Україні (2024–2025 рр.) є диференційованими: нічний тариф (23:00–7:00) значно нижчий за денний, що стимулює перенесення нагрівальних процесів на нічні години. Вартість електроенергії: $B = W \cdot T_{тариф}$, грн, де $T_{тариф}$ - діючий тариф, грн/кВт·год. Річна економія від роботи в нічний тариф: $\Delta B = W \cdot (T_{ден} - T_{ніч})$, грн.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1)

Вихідні дані (варіант 1): тип ЕНУ - БЕЗПЕРЕРВНА; $G = 300$ кг/год; $c = 3,77$ кДж/(кг·°C); $\theta_1 = 15$ °C; $\theta_2 = 60$ °C; $\eta_{заг} = 0,92$; $kз = 1,15$.

Крок 1. Визначення встановленої потужності.

Примітка: варіант 1 у таблиці позначено як 'П' (ПЕРІОДИЧНА), $T = 1,5$ год, $m = 300$ кг.

$$P_y = kз \cdot m \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1) / (3600 \cdot T \cdot \eta_{заг})$$

$$P_y = 1,15 \cdot 300 \cdot 3,77 \cdot (60 - 15) / (3600 \cdot 1,5 \cdot 0,92)$$

$$P_y = 1,15 \cdot 300 \cdot 3,77 \cdot 45 / 4968 = 58\,597,5 / 4968 \approx 11,80 \text{ кВт}$$

Приймаємо встановлену потужність: $P_y = 11,8$ кВт.

Крок 2. Розрахунок річної витрати електроенергії.

Режим роботи - нічний: $t_{доб} = 8$ год/добу, $N_{рік} = 300$ діб.

$$W = P_y \cdot t_{доб} \cdot N_{рік} = 11,8 \cdot 8 \cdot 300 = 28\,320 \text{ кВт·год/рік}$$

$$B_{\text{ден}} = W \cdot T_{\text{ден}} = 28\,320 \cdot 4,52 = 122\,342 \text{ грн/рік}$$

$$\Delta B = B_{\text{ден}} - B_{\text{ніч}} = 122\,342 - 61\,171 = 61\,171 \text{ грн/рік}$$

Крок 4. Висновок.

Переведення ЕНУ потужністю 11,8 кВт на нічний режим роботи дозволяє заощадити 61 171 грн/рік (50 % вартості). Технологічно такий переключення є можливим для процесів нагрівання з акумулюванням теплоти (баки-термоси, ємнісні водонагрівачі). Економічна доцільність беззаперечна.

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

Примітки: «П» - установка ПЕРІОДИЧНОЇ дії (в стовпці m - маса матеріалу, кг; стовпець T - тривалість нагрівання, год); «Б» - установка БЕЗПЕРЕРВНОЇ дії (в стовпці m - продуктивність G, кг/год; стовпець T - прочерк). Тарифи на електроенергію уточнювати за актуальними даними НКРЕКП на момент виконання роботи.

Вар.	Тип ЕНУ	m, кг / G, кг/год	c, кДж/(кг·°C)	θ ₁ , °C	θ ₂ , °C	η заг	k з	T, год (для П)
1	П	300	3.77	15	60	0.92	1.15	1.5
2	Б	500	3.89	10	65	0.9	1.2	-
3	П	450	4.02	12	55	0.88	1.1	2
4	Б	750	3.68	8	70	0.93	1.15	-
5	П	200	3.81	20	75	0.85	1.25	1
6	Б	600	3.95	5	60	0.91	1.2	-
7	П	350	4.1	15	80	0.89	1.15	1.5
8	Б	400	3.72	12	65	0.94	1.1	-
9	П	500	3.85	10	70	0.87	1.2	2.5
10	Б	800	4.05	18	55	0.9	1.15	-
11	П	250	3.76	5	85	0.93	1.1	1
12	Б	550	3.91	8	60	0.88	1.25	-
13	П	380	4.18	20	75	0.86	1.2	2
14	Б	700	3.65	15	65	0.92	1.15	-
15	П	420	3.8	10	80	0.91	1.1	1.5

24	Б	660	3.7	12	60	0.94	1.15	-
25	П	340	3.94	18	75	0.89	1.25	2
26	Б	580	4.15	8	65	0.92	1.1	-
27	П	230	3.84	20	70	0.87	1.2	1
28	Б	680	3.69	5	55	0.93	1.15	-
29	П	370	4.03	15	80	0.9	1.1	2.5
30	Б	520	3.87	10	60	0.85	1.25	-

* Тарифи для розрахунку прийняти: денний $T_{\text{ден}} = 4,32$ грн/кВт·год; нічний $T_{\text{ніч}} = 2,16$ грн/кВт·год (відповідно до двозонного тарифу). При самостійному уточненні - використовувати постанови НКРЕКП поточного року.

Практична робота № 1.2

Тема: «Способи і пристрої перетворення електричної енергії в теплову»

ЗАВДАННЯ

1. За вихідними даними варіанта визначити розрахункову температуру нагрівача T_r та струм нагрівального елемента I .
2. За таблицею допустимих струмових навантажень вибрати діаметр d ніхромового дроту.
3. Розрахувати питомий електричний опір ρ_d матеріалу нагрівача при дійсній (допустимій) робочій температурі T_d .
4. Визначити необхідну довжину дроту l_p та параметри спіралі: середній діаметр витка D , крок h , кількість витків n і довжину спіралі $l_{сп}$.
5. Зробити висновок про придатність обраного нагрівального матеріалу для заданих умов експлуатації.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

$\rho_{20} = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Ом·м). Температурний коефіцієнт опору ніхрому $\alpha_r = 16 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, фехралю $\alpha_r = 20 \cdot 10^{-6}$ 1/°C. Фехраль дешевший, але крихкіший; ніхром міцніший механічно.

Питомий опір при дійсній температурі T_d : $\rho_d = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha_r \cdot (T_d - 20)]$. Для вибору діаметра дроту d за таблицею струмових навантажень визначають розрахункову температуру: $T_r = K_m \cdot K_s \cdot T_d$, де K_m - коефіцієнт монтажу (0,3–0,9, залежить від конструкції нагрівача); K_s - коефіцієнт середовища (1,0 - нерухоме повітря; 1,3–2,0 - потік повітря; 2,5 - нерухома вода; 3,0–3,5 - потік води). Поточний нагрівача: $I = P/U$ (для однофазного) або $I = P/(\sqrt{3} \cdot U)$ для трифазного трикутника.

Необхідна довжина дроту: $l_p = (U^2/P) \cdot (\pi d^2/4) / \rho_d$, де d - діаметр дроту (м). Цей вираз отримано з $R = \rho_d \cdot l_p / S = U^2/P$, де $S = \pi d^2/4$. Параметри спіралі (рис. 3.3 підручника): середній діаметр витка $D = (6 \dots 10) \cdot d$; крок $h = (2 \dots 4) \cdot d$; кількість витків $n = l_p / (\pi \cdot D)$; довжина спіралі $l_{сп} = h \cdot n$. Допустима питома поверхнева потужність для відкритої спіралі у нерухомому повітрі $P_F = (2-6) \cdot 10^4$ Вт/м², у ТЕНі у воді - $(36-38) \cdot 10^4$ Вт/м². Термін служби ТЕНів у рідинному середовищі - не менше 5000 год, у повітрі - до 12 000 год.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1)

Вихідні дані: $P = 3,5$ кВт; $U = 220$ В; матеріал - ніхром Х20Н80; $\rho_{20} = 1,10 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; $\alpha_r = 16 \cdot 10^{-6}$ 1/°C; $T_d = 400$ °C; середовище - повітря (П); $K_m = 0,85$; $K_s = 1,0$.

Крок 1. Розрахункова температура для вибору діаметра дроту:

$T_r = K_m \cdot K_s \cdot T_d = 0,85 \cdot 1,0 \cdot 400 = 340$ °C \rightarrow приймаємо $T_r \approx 400$ °C (ближче в таблиці)

15,9 А). ✓

(*Примітка: повна таблиця 3.2 підручника охоплює d від 0,1 до 1,4 мм; для більших діаметрів використовують формульний розрахунок або розширені таблиці виробника дроту.)

Крок 4. Питомий опір при $T_d = 400$ °С:

$$\rho_{400} = 1,10 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 16 \cdot 10^{-6} \cdot (400 - 20)] = 1,10 \cdot 10^{-6} \cdot 1,00608 \approx 1,107 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Крок 5. Опір нагрівача:

$$R = U^2 / P = 220^2 / 3500 = 13,83 \text{ Ом}$$

Крок 6. Довжина дроту ($d = 1,8$ мм = 0,0018 м; $S = \pi \cdot d^2 / 4 = 2,545 \cdot 10^{-6}$ м²):

$$ln = R \cdot S / \rho_{400} = 13,83 \cdot 2,545 \cdot 10^{-6} / 1,107 \cdot 10^{-6} = 31,8 \text{ м}$$

Крок 7. Параметри спіралі ($D = 8d = 14,4$ мм; $h = 3d = 5,4$ мм):

$$n = ln / (\pi \cdot D) = 31,8 / (3,14 \cdot 0,0144) = 703 \text{ витки}$$

$$l_{cn} = h \cdot n = 0,0054 \cdot 703 = 3,8 \text{ м}$$

Висновок. Для нагрівача потужністю 3,5 кВт при напрузі 220 В у відкритому повітрі з матеріалу Х20Н80 необхідний дріт діаметром 1,8 мм, довжиною 31,8 м. Спіраль нараховує 703 витки, її довжина 3,8 м. Матеріал Х20Н80 придатний для заданої температури 400 °С (максимально допустима 1100 °С при безперервній роботі).

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

Скорочення: П - нерухоме повітря; В - нерухома вода. Значення K_m і K_c задані у відповідності до умов монтажу і середовища для кожного варіанта. Матеріал дроту Х20Н80: $\rho_{20} = 1,10 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\alpha_r = 16 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, T_{\max} (безп.) = 1100 °С; Х13Ю4: $\rho_{20} = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\alpha_r = 20 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, $T_{\max} = 1200$ °С.

8	4.5	380	X13Ю4	1.25	20	500	П	0.8	1.3
9	1.8	220	X20Н80	1.1	16	300	П	0.8	1
10	6	380	X20Н80	1.1	16	550	П	0.9	1.5
11	2.2	220	X13Ю4	1.25	20	380	П	0.85	1
12	3.5	380	X20Н80	1.1	16	480	П	0.85	1.3
13	1.2	220	X20Н80	1.1	16	350	В	0.85	2.5
14	4	220	X13Ю4	1.25	20	430	П	0.8	1
15	2.8	380	X20Н80	1.1	16	420	П	0.85	1.3
16	3.2	220	X20Н80	1.1	16	500	П	0.9	2
17	1.6	220	X13Ю4	1.25	20	400	П	0.8	1
18	5.5	380	X20Н80	1.1	16	580	П	0.9	1.5
19	2	220	X20Н80	1.1	16	320	В	0.85	2.5
20	4.5	220	X13Ю4	1.25	20	460	П	0.85	1
21	3	380	X20Н80	1.1	16	440	П	0.85	1.3
22	1.4	220	X13Ю4	1.25	20	370	П	0.8	1
23	4.8	380	X20Н80	1.1	16	520	П	0.9	1.5
24	2.4	220	X20Н80	1.1	16	380	В	0.85	2.5
25	3.6	380	X13Ю4	1.25	20	490	П	0.8	1.3
26	1	220	X20Н80	1.1	16	330	П	0.8	1
27	5.2	380	X20Н80	1.1	16	560	П	0.9	1.5
28	2.6	220	X13Ю4	1.25	20	410	П	0.85	1
29	3.8	380	X20Н80	1.1	16	460	П	0.85	1.3
30	1.5	220	X13Ю4	1.25	20	420	В	0.85	2.5

Для всіх варіантів прийняти: $D = 8 \cdot d$; $h = 3 \cdot d$; $n = \text{Iп}/(\pi \cdot D)$; $\text{Iсп} = h \cdot n$. Перевіряти умову $I \leq I_{\text{доп}}$ за таблицею струмових навантажень (табл. 3.2 підручника); якщо табличне значення не покриває заданий струм - збільшувати d до наступного рядка таблиці.

Практична робота № 1.3

Тема: «Електричне нагрівання опором. Розрахунок електродного водонагрівача»

допустимості напруженості поля $E_{доп}$.

3. Визначити геометричний коефіцієнт K для трифазної системи з плоскими пластинами.
4. Обчислити середню температуру нагрівання θ_c і середній питомий опір води ρ_c за період нагрівання.
5. Знайти висоту електродів h за формулою теплового балансу. Перевірити максимальну густину струму j на допустимість ($j_{доп} = 0,5 \text{ А/см}^2$ для плоских електродів).
6. Підібрати стандартний тип водонагрівача з таблиці КЕВ (табл. 2.1 підручника). Зробити висновок.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електродний нагрів - прямий нагрів провідника другого роду (рідини): електричний струм протікає безпосередньо через шар рідини між електродами, і теплота виділяється за законом Джоуля–Ленца рівномірно по всьому об'єму. В АПК електродні водонагрівачі застосовуються для гарячого водопостачання ферм, пастеризації молока, стерилізації, запарювання кормів.

Принципова відмінність від елементного нагрівача: у відсутності рідини між електродами жодна потужність не споживається (немає провідника для струму) - це захищає нагрівач від перегорання при 'сухому ході'. Проте потужність зростає у 3–4 рази при нагріванні від 10 до 100 °С, оскільки питомий опір води ρ зменшується з підвищенням температури: $\rho(T) = 40 \cdot \rho_{20} / (20 + T)$, Ом·м. Тому електродні нагрівачі переважно працюють у проточному режимі, підтримуючи сталий перепад температур.

Розрахункова потужність проточного нагрівача: $P_y = k_z \cdot G \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1) / 3600$,

$0,5 \cdot (0,1 + 0,2)$. Висота електрода: $h = (40 \cdot K \cdot \rho_{20}) / (3 \cdot U_{\phi} \cdot \rho_{20} \cdot (20 + \theta_c) \cdot 10^{-3})$, м.
Перевірка густини струму: $j = K_n \cdot \text{РМФ} \cdot 10^3 / (U_{\phi} \cdot S) \leq j_{\text{доп}} = 0,5 \text{ А/см}^2$, де $S = b \cdot h$
- площа пластини, РМФ - потужність однієї фази при θ_2 .

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1)

Вихідні дані (варіант 1): $G = 100 \text{ л/год}$; $\theta_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_2 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; $\rho_{20} = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
 $U = 380 \text{ В}$; $n = 4$ пластини; $b = 10 \text{ см}$; $E_{\text{доп}} = 150 \text{ В/см}$; $K_n = 1,2$.

Крок 1. Розрахункова потужність ($k_z = 1,2$; $\eta = 0,9$):

$$P_y = k_z \cdot G \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1) / (3600 \cdot \eta) = 1,2 \cdot 100 \cdot 4,2 \cdot (90 - 15) / (3600 \cdot 0,9) = 11,67 \text{ кВт}$$

Крок 2. Відстань між пластинами ($U_{\phi} = 380/\sqrt{3} = 220 \text{ В}$; $1 \text{ В/см} = 100 \text{ В/м}$):

$$l = U_{\phi} / E_{\text{доп}} = 220 / (150 \cdot 100) = 0,0147 \text{ м} \approx 1,47 \text{ см} \rightarrow \text{приймаємо } l = 2,5 \text{ см}$$

(За рекомендацією підручника при $P = 5\text{--}25 \text{ кВт}$ беруть $l = 2,5\text{--}3 \text{ см}$; $l < 1,5 \text{ см}$ не рекомендується.)

Крок 3. Геометричний коефіцієнт ($l = 2,5 \text{ см}$; $n = 4$; $b = 10 \text{ см}$):

$$K = l / [(n-1) \cdot b] = 2,5 / [(4-1) \cdot 10] = 2,5 / 30 = 0,0833$$

Крок 4. Середня температура і питомий опір:

$$\theta_c = 0,5 \cdot (15 + 90) = 52,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_c = 40 \cdot \rho_{20} / (20 + \theta_c) = 40 \cdot 30 / (20 + 52,5) = 1200 / 72,5 = 16,55 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Крок 5. Висота електродів:

$$h = (40 \cdot K \cdot P_y \cdot \rho_{20}) / (3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{20} \cdot (20 + \theta_c))$$

$$h = (40 \cdot 0,0833 \cdot 11670 \cdot 30) / (3 \cdot 220^2 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 72,5)$$

$$h = 1\,167\,036 / 99\,099 \approx 11,8 \text{ см} \rightarrow \text{приймаємо } h = 12 \text{ см}$$

Крок 6. Перевірка максимальної густини струму (потужність однієї фази при $\theta_2 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$j = \frac{K \cdot T \cdot M \cdot \Phi \cdot 10^{-7}}{(U \cdot \Phi \cdot S)} = 1,2 \cdot 42507 / (220 \cdot 120) = 50707 / 26400 = 0,192 \text{ А/см}^2$$

$$j = 0,192 \text{ А/см}^2 < j_{\text{доп}} = 0,5 \text{ А/см}^2 \checkmark$$

Крок 7. Підбір стандартного водонагрівача. Розрахована $P_y = 11,67$ кВт. За табл. 2.1: обираємо КЕВ-40/0,4 (40 кВт) або, якщо шукати мінімально достатній, то тип ЕВН-16/0,4 (16 кВт) при $\rho_{20} = 6\text{--}40$ Ом·м. Продуктивність ЕВН-16 при нагріві на 25 °С: $0,6$ м³/год. При нагріві на $(90\text{--}15) = 75$ °С потрібна менша продуктивність - ЕВН-16/0,4 підходить з запасом.

Висновок: Трифазний електродний водонагрівач із 4 плоскими пластинами шириною 10 см і висотою 12 см забезпечує необхідну потужність $11,67$ кВт. Максимальна густина струму $0,192$ А/см² не перевищує допустимої $0,5$ А/см². Для заміни стандартним обладнанням рекомендується ЕВН-16/0,4.

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

У всіх варіантах: трифазна система з плоскими електродами, $U = 380$ В, $k_z = 1,2$, $\eta = 0,9$, $j_{\text{доп}} = 0,5$ А/см². Фазна напруга $U_{\phi} = U/\sqrt{3} = 220$ В. $c = 4,2$ кДж/(кг·°С), $\rho(T) = 40 \cdot \rho_{20}/(20+T)$.

Вар.	G, л/год	θ_1 , °С	θ_2 , °С	ρ_{20} , Ом·м	U, В	n, шт.	b, см	Eдоп, В/см	Kн
1	100	15	90	30	380	4	10	150	1.2
2	80	10	85	25	380	4	8	140	1.2
3	120	20	95	35	380	4	12	160	1.3
4	60	8	80	20	380	3	8	130	1.2
5	150	15	90	40	380	5	12	150	1.3
6	90	12	88	28	380	4	10	145	1.2
7	110	18	92	32	380	4	10	155	1.2
8	70	10	82	22	380	3	8	135	1.2
9	130	20	95	38	380	5	12	158	1.3
10	85	5	80	26	380	4	9	140	1.2
11	100	15	85	30	380	4	10	148	1.2
12	75	10	90	24	380	3	8	142	1.2

21	135	20	95	39	380	5	12	157	1.3
22	92	5	82	26	380	4	9	141	1.2
23	108	15	88	32	380	4	10	149	1.2
24	78	10	90	24	380	3	9	144	1.2
25	120	18	92	35	380	4	11	154	1.2
26	68	8	80	21	380	3	8	133	1.2
27	145	15	95	40	380	5	12	156	1.3
28	82	12	85	28	380	4	9	142	1.2
29	112	20	92	33	380	4	10	151	1.2
30	96	10	88	30	380	4	10	148	1.2

Практична робота № 1.4

Тема: «Побічне нагрівання опором. Розрахунок електрокалориферної установки для тваринницького приміщення»

ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати мінімальний повітрообмін L (м³/год) для зимового режиму за нормою на 1 кг живої маси тварини.
2. Визначити необхідну сумарну потужність електрокалориферних установок P (кВт) за рівнянням теплового балансу приміщення.
3. Розрахувати потужність однієї установки РЕКУ = P/n за заданою кількістю ЕКУ n .

Побічне (непряме) нагрівання опором - це нагрівання повітря через проміжний теплоносій - нагрівальні елементи (ТЕНи або спіралі), тобто без безпосереднього контакту струму з нагрівальним середовищем. Це найпоширеніший спосіб електричного обігрівання тваринницьких приміщень в АПК. Правильний мікроклімат - температура, вологість, повітрообмін - безпосередньо впливає на здоров'я, продуктивність і витрату корму поголів'ям.

Електрокалориферна установка (ЕКУ) серії СФОЦ складається з електрокалорифера (блок ТЕНів у металевому корпусі, температура нагріву до 180 °С) і відцентрового вентилятора. Нагрівники поділено на три рівні секції, які вмикаються незалежно пускачами КМ1–КМ3, що дає ступінчасте регулювання потужності на рівнях 33, 66 і 100 %. Обов'язкова вимога: блокування не допускає вмикання калорифера при зупиненому вентиляторі - без потоку повітря ТЕНи швидко перегріваються та виходять з ладу. Виконання ІЗ має вологохімічностійке покриття і призначене для тваринницьких приміщень з хімічно агресивним середовищем.

Розрахунковий мінімальний повітрообмін (зима): $L = N \cdot m \cdot L_1$, де N - кількість тварин; m - середня жива маса, кг; L_1 - норма на 1 кг маси, м³/(год·кг): для ВРХ $L_1 = 0,17$; для свиней $L_1 = 0,20$ м³/(год·кг). Потужність ЕКУ (кВт): $P = [(g_0 \cdot V + C_v \cdot \rho_v \cdot L) \cdot (T_v - T_z) - \Phi_{ж} \cdot N - \Phi_m] / (3600 \cdot \eta)$, де g_0 - теплова характеристика будівлі, кДж/(м³·год·°С): 2,1–2,9 - утеплена, 2,9–5,1 - неутеплена; V - об'єм, м³; $C_v = 1,0$ кДж/(кг·°С); $\rho_v = 1,3$ кг/м³; T_v і T_z - температури всередині і зовні, °С; $\Phi_{ж}$ - тепловиділення однієї тварини, кДж/год (корови 955, свині 680); N - поголів'я; Φ_m - потужність місцевих нагрівачів, кДж/год; $\eta = 0,92$.

Крок 1. Мінімальний повітряний обмін (зима).

$$L = N \cdot m \cdot L_1 = 1800 \cdot 80 \cdot 0,20 = 28\,800 \text{ м}^3/\text{год}$$

Крок 2. Сумарна потужність ЕКУ ($\eta = 0,92$; $C_v \cdot \rho_v = 1,0 \cdot 1,3 = 1,3$ кДж/(м³·°С)):

$$P = [(g_0 \cdot V + C_v \cdot \rho_v \cdot L) \cdot (T_v - T_3) - \Phi_{жс} \cdot N - \Phi_M] / (3600 \cdot \eta)$$

$$P = [(2,5 \cdot 5500 + 1,3 \cdot 28800) \cdot (18 - (-20)) - 955 \cdot 1800 - 5400] / (3600 \cdot 0,92)$$

$$P = [(13750 + 37440) \cdot 38 - 1719000 - 5400] / 3312$$

$$P = [51190 \cdot 38 - 1724400] / 3312 = [1945220 - 1724400] / 3312 = 220820 / 3312 \approx 66,7 \text{ кВт}$$

Крок 3. Потужність однієї установки:

$$P_{EKU} = P / n = 66,7 / 2 = 33,4 \text{ кВт}$$

Крок 4. Підбір типу СФОЦ (ИЗ - для тваринницьких):

Потрібна $P_n \geq 33,4$ кВт. За таблицею СФОЦ-ИЗ: СФОЦ-40/0,5-ИЗ має $P_n = 45,0$ кВт $\geq 33,4$ кВт

СФОЦ-25/0,5-ИЗ має $P_n = 22,5$ кВт $< 33,4$ кВт - не підходить.

Крок 5. Перевірка запасу потужності:

$$P_n / P_{EKU} = 45,0 / 33,4 = 1,35$$

Запас 35 % є достатнім для покриття пікового навантаження в найхолодніші дні. Для скорочення витрат електроенергії рекомендується розглянути встановлення рекуперативного теплообмінника серії ЕКО або УТ-Ф-12 (к.к.д. утилізації 0,4–0,6), що дозволить знизити розрахункову потужність на 30–50 %.

Відповідь: встановлюємо 2 × СФОЦ-40/0,5-ИЗ (сумарна потужність нагрівників $2 \cdot 45 = 90$ кВт).

Таблиця підбору. Технічні характеристики ЕКУ серії СФОЦ (скорочено)

25/0,5-И1	22,5	2500	3	И1
СФОЦ-40/0,5-И1	45,0	3500	3	И1
СФОЦ-60/0,5-И1	67,5	4000	3	И1
СФОЦ-100/0,5-И1	90,0	5000	3	И1
СФОЦ-25/0,5-И3	22,5	3000	3	И3 (аграр.)
СФОЦ-40/0,5-И3	45,0	8000	3	И3 (аграр.)
СФОЦ-63/0,5-И3	63,0	12000	3	И3 (аграр.)
СФОЦ-100/0,5-И3	90,0	12000	3	И3 (аграр.)
СФОЦ-160/0,5-И3	157,5	20000	3	И3 (аграр.)

Примітки: виконання И1 - для загальпромислових приміщень; И3 - для тваринницьких і птахівничих з підвищеною вологістю і агресивним середовищем. При підборі перевіряти: $R_n \geq REKY$; продуктивність вентилятора \geq розрахунковий L.

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

К - корівник (утеплений); С - свинарник (утеплений). Для всіх варіантів: $C_v = 1,0$ кДж/(кг·°С); $\rho_v = 1,3$ кг/м³; $\eta = 0,92$. L₁ береться з умови завдання. Ф_м = 0 - місцеві нагрівачі відсутні. n - задана кількість ЕКУ.

Вар.	Тип	V, м ³	T _в , °С	T _з , °С	g ₀	N, гол.	Фж, кДж/год	m, кг	L ₁ , м ³ /(год·кг)	Ф _м , кДж/год	n, шт.
1	С	5500	18	-20	2.5	1800	955	80	0.2	5400	2
2	К	3600	10	-20	2.3	200	955	500	0.17	0	2
3	К	4200	10	-25	2.8	150	955	500	0.17	0	2
4	С	3200	16	-15	2.1	1000	680	80	0.2	0	1

13	К	5500	12	-30	3.2	220	955	540	0.17	0	3
14	С	3500	18	-15	2.2	800	680	70	0.2	2880	1
15	К	3800	10	-20	2.4	140	955	490	0.17	0	2
16	С	5000	16	-25	2.6	1600	680	80	0.2	5760	2
17	К	4000	12	-20	2.3	170	955	510	0.17	0	2
18	С	6500	18	-25	2.8	2200	680	85	0.2	7920	3
19	К	5200	10	-30	3	200	955	520	0.17	0	2
20	С	4200	16	-20	2.5	1300	680	75	0.2	4680	2
21	К	3400	10	-15	2.2	130	955	480	0.17	0	1
22	С	5800	18	-30	3	2100	680	80	0.2	7560	2
23	К	4600	12	-25	2.7	190	955	530	0.17	0	2
24	С	3800	16	-15	2.1	900	680	70	0.2	3240	1
25	К	5400	10	-30	3.2	240	955	550	0.17	0	3
26	С	5200	18	-25	2.6	1700	680	80	0.2	6120	2
27	К	4100	10	-20	2.4	155	955	500	0.17	0	2
28	С	4800	16	-20	2.5	1400	680	80	0.2	5040	2
29	К	5100	12	-25	2.8	210	955	540	0.17	0	2
30	С	6200	18	-30	3.1	2300	680	85	0.2	8280	3

*Норми L_1 (зима): ВРХ - $0,17 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{кг})$; свині - $0,20 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{кг})$. Тепловиділення: корови - 955 кДж/год ; свині - 680 кДж/год . Підбір установки виконувати за таблицею СФОЦ; обирати виконання ІЗ для тваринницьких приміщень.

Практична робота № 1.5

Тема: «Електричні водонагрівники. Розрахунок і підбір для системи водопостачання тваринницької ферми»

ЗАВДАННЯ

3. За таблицею підібрати тип стандартного водонагрівача (або котла КЕВ) з умовою $P_n \geq P$.

4. Визначити фактичний час нагрівання води в акумуляційному водонагрівачі до заданої температури $\theta_{\text{гар}}$ при обраній потужності P_n .

5. Порівняти фактичний час нагрівання з максимально допустимим (не більше 8 год для нічного тарифу). Зробити висновок про економічну доцільність нічного режиму.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електричні водонагрівники в АПК призначені для нагрівання води для поїння тварин, санітарно-гігієнічних потреб і технологічних цілей. За конструкцією вони поділяються на акумуляційні (бак з ТЕНами або електродами, що нагріває і зберігає запас гарячої води) і проточні (безперервне нагрівання потоку води). Акумуляційні установки (УАП, САЗС, ВЕП) найбільш вигідні при роботі в нічному тарифному режимі: нагрів здійснюється вночі при зниженому тарифі, а вдень водою з бака-акумулятора задовольняється поточна потреба ферми.

Добова витрата гарячої води: $Q_{\text{доб}} = a \cdot N$, $\text{дм}^3/\text{добу}$, де a - добова норма поїння на одну голову ($\text{дм}^3/\text{добу}$): корови дійні - 65, бики й нетелі - 40, телята - 15, свиноматки з приплодом - 20, свині на відгодівлі - 9; N - кількість тварин.

Розрахункова потужність водонагрівача (кВт):

$$P = k_{\text{доб}} \cdot k_{\text{год}} \cdot a \cdot C \cdot N \cdot (\theta_{\text{гар}} - \theta_{\text{хол}}) / (3600 \cdot 24 \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{м}})$$

де $k_{\text{доб}} = 1,2-1,3$ - коефіцієнт добової нерівномірності; $k_{\text{год}} = 1,6-2,0$ - годинної нерівномірності; $C = 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $\theta_{\text{гар}}$ і $\theta_{\text{хол}}$ - температури гарячої і холодної води, $^\circ\text{C}$; $\eta_{\text{в}} = 0,85-0,95$ - ккд водонагрівача; $\eta_{\text{м}} = 0,80-0,90$ - ккд

2026 рр.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1)

Вихідні дані: корівник, $N = 240$ дійних корів; $a = 65$ дм³/добу; $\theta_{\text{гар}} = 12$ °С; $\theta_{\text{хол}} = 8$ °С; $k_{\text{доб}} = 1,3$; $k_{\text{год}} = 1,8$; $\eta_{\text{в}} = 0,92$; $\eta_{\text{м}} = 0,80$.

Крок 1. Добова витрата гарячої води:

$$Q_{\text{доб}} = a \cdot N = 65 \cdot 240 = 15\,600 \text{ дм}^3/\text{добу} = 15,6 \text{ м}^3/\text{добу}$$

Крок 2. Розрахункова потужність водонагрівача:

$$P = k_{\text{доб}} \cdot k_{\text{год}} \cdot a \cdot C \cdot N \cdot (\theta_{\text{гар}} - \theta_{\text{хол}}) / (3600 \cdot 24 \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{м}})$$

$$P = 1,3 \cdot 1,8 \cdot 65 \cdot 4,2 \cdot 240 \cdot (12 - 8) / (3600 \cdot 24 \cdot 0,92 \cdot 0,80)$$

$$P = 1,3 \cdot 1,8 \cdot 65 \cdot 4,2 \cdot 240 \cdot 4 / 63\,763 = 2\,913\,984 / 63\,763 \approx 9,64 \text{ кВт}$$

Крок 3. Підбір водонагрівача:

Потрібна $P_{\text{н}} \geq 9,64$ кВт. За таблицею: ВЕП-600 має $P_{\text{н}} = 10$ кВт $\geq 9,64$ кВт

✓.

Альтернатива: УАП-400/12 (12 кВт) або САЗС-400/12 (12 кВт) - також підходять із запасом.

Крок 4. Час нагрівання бака ВЕП-600 ($V = 600$ л, $P_{\text{н}} = 10$ кВт, $\eta_{\text{в}} = 0,92$):

$$\tau = V \cdot C \cdot \rho \cdot (\theta_{\text{гар}} - \theta_{\text{хол}}) / (3600 \cdot P_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{в}})$$

$$\tau = 600 \cdot 4,2 \cdot 1 \cdot (12 - 8) / (3600 \cdot 10 \cdot 0,92) = 10\,080 / 33\,120 \approx 0,30 \text{ год} \approx 18 \text{ хв}$$

(Температурний перепад малий - 4 °С, тому час нагрівання незначний. При більшому $\theta_{\text{гар}}$ час зростає.)

Крок 5. Висновок:

Час нагрівання 0,30 год \ll 8 год. Установка ВЕП-600 (10 кВт) повністю забезпечує потребу корівника на 240 голів. Режим роботи в нічні години (23:00–

Тип	Об'єм/Пот. (л/кВт)	$\theta_{\text{вих.}}$ °С	Тип ЕН	ККД, %	Рекомендоване застосування
УАП-400/12	400 л / 12 кВт	90	Елемент. (ТЕН)	96	Акумуляційний; фермські корівники до 200 гол.
УАП-800/18	800 л / 18 кВт	90	Елемент. (ТЕН)	96	Акумуляційний; корівники 200–350 гол.
УАП-1600/30	1600 л / 30 кВт	90	Елемент. (ТЕН)	96	Акумуляційний; корівники 350–500+ гол.
ВЕР-600	600 л / 10 кВт	90	Електродний	91	Проточно-аккумуляційний; корівники ~240 гол.
САЗС-400/12	400 л / 12 кВт	90	Елемент. (ТЕН)	96	Акумуляційний; свинарники, телятники
САЗС-800/18	800 л / 18 кВт	90	Елемент. (ТЕН)	96	Акумуляційний; свинарники
ЕРЗ-100	100 кВт (потокова)	70–95	Електродний	99	Проточна; великі ферми, централізоване ГВП
КЕВ-40/0,4	40 кВт (потокова)	75–95	Електродний	~97	Проточна котельна; ферми будь-якого типу
КЕВ-100/0,4	100 кВт (потокова)	75–95	Електродний	~97	Проточна котельна; великі комплекси

Примітка: акумуляційні установки (УАП, САЗС) рекомендуються для роботи в нічному тарифному режимі з накопиченням гарячої води. Проточні котли (КЕВ, ЕРЗ) - для постійного водопостачання великих ферм.

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

К - корівник; С - свинарник. Для підбору водонагрівача використовувати таблицю підбору. При $\tau > 8$ год розглянути можливість збільшення потужності або кількості нагрівачів.

Вар.	Тип	N, гол.	a, дм ³ /доб	$\theta_{\text{гар.}}$, °С	$\theta_{\text{хол.}}$, °С	кдоб	кгод	$\eta_{\text{в}}$	$\eta_{\text{м}}$
1	К	240	65	12	8	1.3	1.8	0.92	0.8
2	С	500	20	16	10	1.2	1.8	0.9	0.85
3	К	150	65	12	5	1.3	1.6	0.9	0.82
4	С	800	9	15	8	1.2	2	0.92	0.8

13	К	280	65	14	6	1.3	1.8	0.95	0.82
14	С	500	13	15	8	1.2	2	0.88	0.8
15	К	400	40	12	5	1.3	1.6	0.92	0.85
16	С	900	9	14	10	1.2	1.8	0.9	0.8
17	К	250	65	12	8	1.3	1.8	0.95	0.85
18	С	1500	20	16	12	1.2	1.6	0.92	0.85
19	К	320	65	12	5	1.3	1.8	0.9	0.82
20	С	700	13	15	10	1.2	2	0.88	0.8
21	К	160	40	12	6	1.3	1.6	0.92	0.82
22	С	1100	9	14	8	1.2	1.8	0.9	0.85
23	К	380	65	14	10	1.3	1.8	0.95	0.82
24	С	600	20	16	12	1.2	1.6	0.88	0.8
25	К	200	65	12	5	1.3	1.8	0.92	0.85
26	С	1300	9	15	10	1.2	2	0.9	0.8
27	К	450	40	12	6	1.3	1.6	0.92	0.82
28	С	850	13	14	8	1.2	1.8	0.88	0.85
29	К	270	65	12	5	1.3	1.8	0.9	0.82
30	С	400	20	16	10	1.2	1.6	0.92	0.85

Довідково. Норми а (дм³/добу): корови дійні - 65; бики/нетелі - 40; телята - 15; свиноматки з приплодом - 20; свиноматки холості - 12; свині на відгодівлі - 9. С = 4,2 кДж/(кг·°С). ρ_води = 1 кг/л.

Практична робота № 1.6

Тема: «Електротермічне обладнання систем мікроклімату в спорудах захищеного ґрунту. Розрахунок електрообігрівання парника або теплиці»

ЗАВДАННЯ

1. Визначити площу засклення F (м²) для парника або площу покриття теплиці F за вихідними даними варіанта.

кількість паралельних секцій Z , загальну довжину проводу на фазу l , довжину однієї секції l_c і крок укладання h .

5. Визначити питому поверхневу потужність нагрівника $\Delta P_{\text{факт}} = P_{\Gamma} \cdot 10^3 / (3 \cdot l)$ (Вт/м) і перевірити її допустимість ($\Delta P_{\text{факт}} \leq \Delta P_{\text{доп}}$).

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Споруди захищеного ґрунту (парники, теплиці, оранжереї) потребують підтримання точного мікроклімату: температурний перепад між ґрунтом і повітрям не має перевищувати 3–5 °С, відхилення температури ґрунту - не більше ± 1 °С, повітря - ± 2 °С. Застосовують три види обігрівання: ґрунтове (найменші тепловтрати, добра теплоаккумуляція - рекомендується для парників); повітряне (калорифер, менші капітальні витрати - для теплиць пізніх строків); комбіноване ґрунтово-повітряне (найкращі умови для рослин, більші витрати - для теплиць ранніх строків).

Розрахункова потужність нагрівних елементів: $P = k \cdot F \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{зов}}) \cdot 10^{-3}$, кВт, де k - наведений коефіцієнт теплопередачі через покриття (скло або плівка), Вт/(м²·°С): залежить від швидкості вітру - від 4 до 12 Вт/(м²·°С); F - площа засклення, м²; $T_{\text{вн}}$ і $T_{\text{зов}}$ - розрахункові температури всередині і зовні, °С. Площа засклення парника: $F = a \cdot b \cdot n \cdot \xi$, де $a = 1,6$ м; $b = 1,06$ м - розміри однієї рами; n - кількість рам; $\xi = 0,95$ - коефіцієнт (дерев'яні частини рами). При комбінованому обігріванні розподіл: $P_{\Gamma} = P/2$; $P_{\text{п}} = P/2$ (або $P_{\Gamma} = P/3$; $P_{\text{п}} = 2P/3$).

Параметри нагрівального проводу ПОСХП або ПОСХВ для ґрунтового обігрівання. Кількість паралельних секцій на фазу: $Z = \sqrt{(P_1 \cdot 10^3 \cdot r / (U_{\text{ф}}^2 \cdot \Delta P_{\text{доп}}))}$, де $P_1 = P_{\Gamma}/3$ - потужність на фазу (кВт); r - питомий опір при робочій температурі (ПОСХП: $r = 0,190$ Ом/м; ПОСХВ: $r = 0,174$ Ом/м); $U_{\text{ф}} = 220$ В; $\Delta P_{\text{доп}}$ -

Вихідні дані: парник; $n = 30$ рам; культура - капуста; $T_{вн} = 18$ °С; $T_{зов} = -5$ °С; $k = 11,6$ Вт/(м²·°С); обігрів ґрунтовий (Г); провід ПОСХП; $U = 220$ В.

Крок 1. Площа засклення парника ($a = 1,6$ м; $b = 1,06$ м; $\xi = 0,95$):

$$F = a \cdot b \cdot n \cdot \xi = 1,6 \cdot 1,06 \cdot 30 \cdot 0,95 = 48,3 \text{ м}^2$$

Крок 2. Загальна розрахункова потужність:

$$P = k \cdot F \cdot (T_{вн} - T_{зов}) \cdot 10^{-3} = 11,6 \cdot 48,3 \cdot (18 - (-5)) \cdot 10^{-3} = 11,6 \cdot 48,3 \cdot 23 \cdot 0,001 = 12,9 \text{ кВт}$$

Крок 3. Розподіл потужності (ґрунтовий обігрів = вся потужність, без повітряного):

$$P_г = P = 12,9 \text{ кВт}; P_n = 0 \text{ кВт (тільки ґрунтовий)}$$

Крок 4. Параметри нагрівального проводу ПОСХП ($r = 0,190$ Ом/м; $\Delta P_{\text{доп}} = 12$ Вт/м; $U_{\phi} = 220$ В):

$$P_1 = P_г / 3 = 12,9 / 3 = 4,30 \text{ кВт} \rightarrow P_1 \cdot 10^3 = 4300 \text{ Вт}$$

Кількість паралельних секцій:

$$Z = \sqrt{(P_1 \cdot 10^3 \cdot r / (U_{\phi}^2 \cdot \Delta P_{\text{доп}}))} = \sqrt{(4300 \cdot 0,190 / (220^2 \cdot 12))} = \sqrt{(817 / 580\,800)} = \sqrt{0,001407} = 0,038$$

Оскільки $Z < 1$, приймаємо $Z = 1$ (одна секція на фазу). Це стандартна практика - якщо $Z < 1$, беруть $Z = 1$ і уточнюють формулою розрахунку довжини.

Загальна довжина проводу на фазу:

$$l = P_1 \cdot 10^3 / \Delta P_{\text{доп}} = 4300 / 12 = 358 \text{ м} \rightarrow \text{уточнення: } l = (U_{\phi}^2 \cdot Z) / (P_1 \cdot 10^3 \cdot r) = (220^2 \cdot 1) / (4300 \cdot 0,190) = 48\,400 / 817 \approx 59 \text{ м}$$

Примітка: у підручнику (приклад стор. 99) використана формула $l_c = P_1 \cdot 10^3 / \Delta P_{\text{доп}} = 2150 / 12 = 179$ м при $P_1 = 2,15$ кВт/фазу (ділення на 3 фаз, $n=1$ секція). Перевіримо:

$$h = F / (3 \cdot l) = 48,3 / (3 \cdot 358) = 48,3 / 1074 \approx 0,045 \text{ м} = 4,5 \text{ см}$$

Крок 5. Перевірка питомої поверхневої потужності:

$$\Delta P_{\text{факт}} = P_r \cdot 10^3 / l = 4300 / 358 = 12,0 \text{ Вт/м} \leq \Delta P_{\text{доп}} = 12 \text{ Вт/м} \checkmark$$

Умова виконана. Провід ПОСХП придатний для заданих умов. Загальна довжина проводу: $3 \cdot l = 3 \cdot 358 = 1074 \text{ м}$. Крок укладання 4,5 см - рівномірне поле нагрівання ґрунту.

Таблиця. Характеристики нагрівальних проводів для захищеного ґрунту

Марка проводу	r, Ом/м	ΔP доп., Вт/м	Застосування
ПОСХВ	0,174	9–10	Ґрунт теплиць і парників (кат. А/Б); більш надійний
ПОСХП	0,190	12–13	Ґрунт парників (кат. А/Б); стійкий до вологи
ПОСХВТ	0,174	9–10	Ґрунт теплиць; підвищена надійність

Примітка: у 2024–2026 рр. замість проводів з азбестовою ізоляцією (заборонено) стандартно застосовують ПОСХВ і ПОСХП з поліетиленовою і ПВХ-ізоляцією. Для нових теплиць рекомендуються сучасні нагрівальні кабелі КНРПВ (12 Вт/м) з кремнійорганічною ізоляцією, стійкою до вологи і мінеральних добрив.

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

П - парник (n рам; площа: $F = 1,6 \cdot 1,06 \cdot n \cdot 0,95$); Т - теплиця (F задано в м²). Обігрів: Г - ґрунтовий ($R_r = R$, $R_p = 0$); КГП - комбінований ($R_r = R/2$, $R_p = R/2$). Для теплиць з повітряним обігрівом потужність ЕКУ СФОЦ підбирається окремо (ПР № 4). Провід П - ПОСХП (r = 0,190 Ом/м, ΔP_доп = 12 Вт/м); В - ПОСХВ (r = 0,174 Ом/м, ΔP_доп = 9,5 Вт/м).

8	Т	750	огірки	25	-12	8.5	КГП	В	220
9	П	35	перець	20	-5	10.5	Г	П	220
10	Т	500	капуста	18	-10	9.5	КГП	В	220
11	П	28	огірки	25	-8	11.6	Г	П	220
12	Т	600	томати	22	-15	8	КГП	В	220
13	П	45	капуста	18	-10	12	Г	П	220
14	Т	400	перець	20	-5	7.5	КГП	В	220
15	П	22	салат	16	-5	10	Г	П	220
16	Т	800	огірки	25	-12	9	КГП	В	220
17	П	32	томати	22	-8	11	Г	П	220
18	Т	1000	капуста	18	-15	8.5	КГП	В	220
19	П	38	перець	20	-10	11.6	Г	П	220
20	Т	500	салат	16	-8	7	КГП	В	220
21	П	24	капуста	18	-5	10.5	Г	П	220
22	Т	700	томати	22	-10	8	КГП	В	220
23	П	42	огірки	25	-8	12	Г	П	220
24	Т	350	перець	20	-5	9.5	КГП	В	220
25	П	26	салат	16	-5	11	Г	П	220
26	Т	900	капуста	18	-12	9	КГП	В	220
27	П	36	томати	22	-10	11.6	Г	П	220
28	Т	450	огірки	25	-8	8	КГП	В	220
29	П	48	перець	20	-15	12	Г	П	220
30	Т	600	салат	16	-10	7.5	КГП	В	220

Практична робота № 1.7

Тема: «Електронагрівальні установки для теплової обробки і сушіння с.-г. продуктів і кормів. Розрахунок потужності електродігрівача повітря сушарки»

ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати масу випаровуваної вологи M_v (кг) з матеріалу (зерно або сіно) при сушінні від початкової W_1 до кінцевої W_2 вологості

СФОЦ) з умовою $\Gamma_H \geq \Gamma$.

5. Визначити питому витрату електроенергії на сушіння (кВт·год/т) і порівняти з нормативними значеннями (сіно 30–45 кВт·год/т, зерно 10–25 кВт·год/т). Зробити висновок.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Сушіння є найважливішою операцією підготовки зерна до зберігання і заготівлі сіна. Зерно після збирання може мати відносну вологість 20–22 %, тоді як для тривалого зберігання потрібно не більше 14–16 %. Активне вентилявання з електропідігрівом повітря є найбільш ефективним і економічним способом: питомі витрати електроенергії для зерна - 10–25 кВт·год/т, для сіна - 30–45 кВт·год/т. За відносної вологості зовнішнього повітря менше 65 % вентилявання можливе без підігрівання. При вищій вологості вмикається електрокалорифер і підігріває повітря на 5–15 °С.

Маса випаровуваної води (кг): $M_v = M \cdot (W_1 - W_2) / (100 - W_2)$, де M - початкова маса матеріалу, кг; W_1 і W_2 - початкова і кінцева вологість, %. Тепловий потік, необхідний для нагрівання повітря в калорифері: $\Phi_p = 0,278 \cdot V_t \cdot \rho_v \cdot C_v \cdot (T_k - T_n)$, кВт, де V_t - подача вентилятора, м³/год; $\rho_v = 1,2$ кг/м³; $C_v = 1,0$ кДж/(кг·°С); T_n і T_k - температура повітря до і після калорифера, °С. Коефіцієнт $0,278 = 1000/3600$ перетворює кДж/год на $\text{Вт} \cdot 10^{-3} = \text{кВт}$.

Встановлена потужність ЕКУ: $P = K_z \cdot \Phi_p / (\eta \cdot \eta_k)$, кВт, де $K_z = 1,05$ – $1,10$; $\eta = 0,80$ – $0,90$ - коефіцієнт, що враховує втрати повітря; $\eta_k = 0,90$ – $0,95$ - ккд калорифера. Питома витрата електроенергії: $a = P \cdot \tau / M_{\text{пр}}$, кВт·год/т, де τ - час роботи, год; $M_{\text{пр}}$ - маса висушеного продукту, т. Установки: ВПЕ-6А (32 кВт, подача 13 000 м³/год) - для вентилявання в засіках; бункери БВ-6/БВ-12,5/БВ-

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1 - сушіння сіна)

Вихідні дані: сіно (С); $M = 50\ 000$ кг; $W_1 = 45\ %$; $W_2 = 18\ %$; $T_H = 30\ ^\circ\text{C}$; $T_K = 45\ ^\circ\text{C}$; $V_t = 20\ 000$ м³/год; $\eta = 0,85$; $\eta_k = 0,92$; $K_3 = 1,1$.

Крок 1. Маса випаровуваної вологи:

$$M_v = M \cdot (W_1 - W_2) / (100 - W_2) = 50\ 000 \cdot (45 - 18) / (100 - 18) = 50\ 000 \cdot 27 / 82 = 16\ 463\ \text{кг}$$

Крок 2. Тепловий потік для нагрівання повітря ($\rho_v = 1,2$ кг/м³; $C_v = 1,0$ кДж/(кг·°C)):

$$\Phi_n = 0,278 \cdot V_t \cdot \rho_v \cdot C_v \cdot (T_K - T_H) = 0,278 \cdot 20\ 000 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot (45 - 30)$$

$$\Phi_n = 0,278 \cdot 20\ 000 \cdot 1,2 \cdot 15 = 100\ 080\ \text{Вт} \approx 100,1\ \text{кВт}$$

Крок 3. Встановлена потужність ЕКУ:

$$P = K_3 \cdot \Phi_n / (\eta \cdot \eta_k) = 1,1 \cdot 100,1 / (0,85 \cdot 0,92) = 110,1 / 0,782 \approx 140,8\ \text{кВт}$$

Крок 4. Підбір типу калорифера:

НВЕ-100 має $P_H = 100$ кВт - недостатньо. Потрібні $2 \times \text{НВЕ-100} = 200\ \text{кВт} \geq 140,8$ кВт ✓, або одна установка СФОЦ-160/0,5-ИЗ ($P_H = 157,5$ кВт $\geq 140,8$ кВт ✓).

Обираємо СФОЦ-160/0,5-ИЗ (157,5 кВт нагрівників, продуктивність 20 000 м³/год) - відповідає заданій подачі вентилятора.

Крок 5. Питома витрата електроенергії. Маса висушеного сіна (18 % вологості): $M_{пр} = M - M_v = 50\ 000 - 16\ 463 = 33\ 537$ кг $\approx 33,5$ т.

Час роботи визначається за технологічними даними; типова тривалість сушіння сіна в скирті 45–80 год. Приймаємо $\tau = 60$ год:

$$a = P \cdot \tau / M_{пр} = 140,8 \cdot 60 / 33,5 = 8448 / 33,5 \approx 252\ \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{т}$$

Порівняння: нормативне значення для сушіння сіна 30–45 кВт·год/т (з підручника). Відхилення пояснюється неповним використанням потужності

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

С - сушіння сіна; З - сушіння зерна. Для підбору: НВЕ-63 (63 кВт, 30 000 м³/год), НВЕ-100 (100 кВт, 50 000 м³/год), СФОЦ-40/0,5-И1 (45 кВт), СФОЦ-60/0,5-И1 (67,5 кВт), СФОЦ-100/0,5-И1 (90 кВт), СФОЦ-160/0,5-И3 (157,5 кВт). Фіксовані: $\rho_v = 1,2 \text{ кг/м}^3$; $C_v = 1,0 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}$.

Вар.	Тип	М, кг	W ₁ , %	W ₂ , %	T _н , °C	T _к , °C	Vt, м ³ /год	η	η_k	Kз
1	С	50000	45	18	30	45	20000	0.85	0.92	1.1
2	З	10000	22	14	20	35	13000	0.85	0.9	1.1
3	С	60000	42	17	32	44	20000	0.85	0.92	1.1
4	З	15000	20	14	22	35	13000	0.85	0.9	1.1
5	С	45000	44	18	28	42	20000	0.85	0.92	1.1
6	З	8000	21	15	18	30	13000	0.85	0.9	1.1
7	С	55000	43	17	25	40	20000	0.85	0.92	1.1
8	З	12000	22	14	20	32	13000	0.85	0.9	1.1
9	С	50000	45	18	30	44	20000	0.85	0.95	1.1
10	З	20000	20	13	18	30	13000	0.85	0.9	1.1
11	С	60000	42	16	28	42	20000	0.85	0.92	1.1
12	З	9000	23	14	22	35	13000	0.85	0.9	1.1
13	С	48000	44	17	32	44	20000	0.85	0.92	1.1
14	З	16000	21	14	20	34	13000	0.85	0.9	1.1
15	С	52000	43	18	30	42	20000	0.85	0.95	1.1
16	З	11000	20	15	18	31	13000	0.85	0.9	1.1
17	С	58000	45	17	28	42	20000	0.85	0.92	1.1
18	З	14000	22	14	22	35	13000	0.85	0.9	1.1
19	С	46000	44	18	25	40	20000	0.85	0.92	1.1
20	З	18000	21	13	20	32	13000	0.85	0.9	1.1
21	С	54000	42	17	32	44	20000	0.85	0.92	1.1
22	З	7000	23	15	18	30	13000	0.85	0.9	1.1
23	С	49000	45	18	28	42	20000	0.85	0.95	1.1
24	З	13000	20	14	20	33	13000	0.85	0.9	1.1
25	С	57000	43	17	25	40	20000	0.85	0.92	1.1

вентилюванням - 30–45 кВт·год/т; сушіння зерна в бункерах БВ - 5–15 кВт·год/т; пастеризація молока - 83,5 кВт·год/т; запарювання картоплі - 70 кВт·год/т.

Практична робота № 1.8

Тема: «Електричні холодильні машини і теплові насоси. Розрахунок і підбір для тваринницьких ферм»

ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати холодильну потужність (потужність холодильної установки) P (кВт), необхідну для охолодження продукту від початкової T_1 до кінцевої T_2 температури за заданий час τ .
2. За таблицею підібрати стандартну холодильну установку (або тепловий насос) з умовою $P_{x_уст} \geq P$.
3. Для варіантів типу «ТН» - додатково розрахувати теплову потужність теплового насоса Q_T (кВт), яку можна отримати з теплоти охолодження молока, і кількість підігрітої води за добу (при 3 циклах охолодження).
4. Розрахувати спожиту електроенергію за добу W (кВт·год) для холодильної установки.
5. Зробити висновок про економічність: порівняти W з аналогічними витратами при прямому електронагріві тієї ж кількості води ($K_{пе} = K_{ПЕ}$ теплового насоса, де застосовно).

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електричні холодильні машини в АПК призначені для охолодження молока, зберігання м'яса, риби, овочів і підтримання мікроклімату. Принцип дії - зворотний цикл Карно: компресор стискає пари холодоагенту \rightarrow конденсатор

коефіцієнт запасу, m - маса продукту, k , C - питома теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.
молоко - 3,93; вода - 4,18; м'ясо - 3,60; риба - 3,50; овочі - 3,80; T_1 і T_2 - початкова і кінцева температури, $^\circ\text{C}$; τ - час охолодження, год. При охолодженні 1 т молока рекуператор МКА-2000Л-2А дає 0,7 т теплої води (50–60 $^\circ\text{C}$).

Тепловий насос (ТН) є «зворотною холодильною машиною»: він передає теплоту від низькопотенційного джерела (охолоджуване молоко, ґрунт, повітря) до споживача (гаряча вода, обігрів). Коефіцієнт перетворення енергії: $\text{КПЕ} = (Q_x + Q_t)/W \approx \text{КПЕ} = Q_t/W = K_x + 1$, де Q_t - теплова потужність, Q_x - холодильна. КПЕ компресійних насосів НТ-25/40/80 = 3,1–3,2. На 1 кВт спожитої електроенергії ТН дає 3,1–3,2 кВт теплоти - у 3 рази ефективніше прямого електронагріву. У 2024–2026 рр. теплові насоси типу повітря-вода (інвертори) з КПЕ 3,5–6 стали доступними і є пріоритетним рішенням для ферм, де необхідне одночасне охолодження молока і гаряча вода.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1 - холодильна установка)

Вихідні дані: молоко; $m = 3000$ кг; $C = 3,93$ $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $T_1 = 32$ $^\circ\text{C}$; $T_2 = 5$ $^\circ\text{C}$; $\tau = 3,5$ год; $k = 1,2$; тип Х.

Крок 1. Холодильна потужність:

$$P = k \cdot m \cdot C \cdot (T_1 - T_2) / (3600 \cdot \tau) = 1,2 \cdot 3000 \cdot 3,93 \cdot (32 - 5) / (3600 \cdot 3,5)$$

$$P = 1,2 \cdot 3000 \cdot 3,93 \cdot 27 / 12600 = 381\,924 / 12\,600 \approx 30,3 \text{ кВт}$$

Крок 2. Підбір холодильної установки:

Потрібна $P_{x_уст} \geq 30,3$ кВт. За таблицею: АВ-30 (35 кВт $\geq 30,3$ кВт \checkmark).

Споживана потужність компресора: $W_{\text{ком}} = 18$ кВт.

Крок 3 (для варіантів «Х» - не ТН): визначення кількості теплої води. Молочний завод дає 3000 кг молока за добу (1 цикл). Рекуператор дозволяє

Крок 5. Оцінка економії. При прямому електронагріві 2100 кг води від 10 до 55 °С:

$$W_{\text{нагр}} = m \cdot C \cdot \Delta T / 3600 = 2100 \cdot 4,18 \cdot 45 / 3600 = 109,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Тобто завдяки рекуператору АВ-30 (або аналогу з рекуперацією) 109,7 кВт·год теплової енергії отримується «безкоштовно» з теплоти молока. Це додаткова економія понад 109 кВт·год/добу або ≈ 47 грн/добу при тарифі 4,32 грн/кВт·год (2025 р.).

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 16 - тепловий насос)

Вихідні дані: молоко; $m = 2000$ кг; $T_1 = 33$ °С; $T_2 = 4$ °С; $\tau = 3,0$ год; $k = 1,2$; тип ТН.

Крок 1. Холодильна потужність:

$$P = 1,2 \cdot 2000 \cdot 3,93 \cdot (33 - 4) / (3600 \cdot 3,0) = 1,2 \cdot 2000 \cdot 3,93 \cdot 29 / 10800 = 273 \text{ 384} / 10 \text{ 800} \approx 25,3 \text{ кВт}$$

Крок 2. Підбір ТН. Потрібна $P_{x_уст} \geq 25,3$ кВт. НТ-25 (холодильна потужн. $m_{ax} = 38,4$ кВт $\geq 25,3$ кВт ; споживана потужн. $\approx 8-18$ кВт; КПЕ = 3,14).

Крок 3. Теплова потужність ТН (кількість теплоти, переданої гарячій воді):

$$Q_t = \text{КПЕ} \cdot W_{\text{ком}} \text{ (або } Q_t = Q_x + W_{\text{ком}})$$

При мінімальному режимі: $W_{\text{ком}} = 8$ кВт; $Q_t = 8 \cdot 3,14 = 25,1$ кВт - цього достатньо для нагрівання $2000 \cdot 0,7 = 1400$ кг води/добу до 50–60 °С. При 3 циклах: $3 \cdot 1400 = 4200$ кг/добу.

Крок 4. Спожита електроенергія ТН за цикл: $W = W_{\text{ком}} \cdot \tau = 8 \cdot 3,0 = 24$ кВт·год.

Крок 5. Порівняння. Якби нагрівати 1400 кг води від 10 до 55 °С прямим

* Холодоагент R-12 (фреон-12) заборонений Монреальським протоколом з 1995 р. У нових і модернізованих установках замінений на R-134a (без озоноруйнівної дії). Установки ТОМ-2А з аміаком R-717 актуальні, але потребують вибухозахищеного виконання електрообладнання.

Тип	Холодильна потужн., кВт	Спожив. потужн., кВт	Холодоагент	Застосування
МКА-2000Л-2А	12	-	R-134a*	Охолодження молока 2000 л/добу; рекуператор → 0,7 т теплої води/т молока
ТОМ-2А	12	7,5	R-717(NH ₃)	Охолод. молока 1800 л від 36 до 6°C за 2,5 год; аміак
АВ-30	35	18	R-717(NH ₃)	Охолодження води і молокопродуктів
НТ-25	11,6–32,6	8–18	-	Тепловий насос; КПЕ = 3,14; теплова + холодильна
НТ-40	21–65	17–36	-	Тепловий насос; КПЕ = 3,10; великі ферми
НТ-80	35–128	24–75	-	Тепловий насос; КПЕ = 3,24; великі комплекси

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

Тип «Х» - тільки холодильна установка (завдання 1–2, 4–5). Тип «ТН» - холодильна установка + тепловий насос (всі 5 завдань). Для молока $C = 3,93$ кДж/(кг·°C); для інших продуктів - за таблицею в теоретичних відомостях.

Вар.	Продукт	m, кг	C, кДж/(кг·°C)	T ₁ , °C	T ₂ , °C	τ, год	k	Тип
1	молоко	3000	3.93	32	5	3.5	1.2	Х
2	молоко	2000	3.93	35	4	2.5	1.2	Х
3	вода	5000	4.18	20	5	4	1.2	Х
4	молоко	1500	3.93	36	6	3	1.2	Х
5	м'ясо	2500	3.6	18	0	5	1.2	Х
6	молоко	4000	3.93	33	4	3.5	1.2	Х

15	МОЛОКО	2200	3.93	35	6	3.5	1.2	X
16	МОЛОКО	2000	3.93	33	4	3	1.2	TH
17	МОЛОКО	3000	3.93	35	5	3.5	1.2	TH
18	МОЛОКО	2500	3.93	32	4	2.5	1.2	TH
19	МОЛОКО	4000	3.93	34	6	4	1.2	TH
20	МОЛОКО	1500	3.93	36	5	2.5	1.2	TH
21	МОЛОКО	3500	3.93	33	4	3.5	1.2	TH
22	МОЛОКО	2800	3.93	35	5	3	1.2	TH
23	МОЛОКО	2000	3.93	32	6	2.5	1.2	TH
24	МОЛОКО	3200	3.93	34	4	3.5	1.2	TH
25	МОЛОКО	1800	3.93	36	5	3	1.2	TH
26	МОЛОКО	4500	3.93	33	4	4	1.2	TH
27	МОЛОКО	2400	3.93	35	6	3	1.2	TH
28	МОЛОКО	3000	3.93	32	4	3.5	1.2	TH
29	МОЛОКО	2600	3.93	34	5	3	1.2	TH
30	МОЛОКО	5000	3.93	33	4	4	1.2	TH

Довідково: при охолодженні молока 1 т → 0,7 т теплої води (50–60 °С) через рекуператор. КПЕ теплових насосів НТ-25, НТ-40, НТ-80 відповідно 3,14; 3,10; 3,24. Тарифи 2025 р. (НКРЕКП): денний 4,32 грн/кВт·год; нічний 2,16 грн/кВт·год.

Розрахунок і підбір печі опору та індукційного нагрівача»

ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати встановлену потужність електричної печі опору P_y (кВт), необхідну для нагрівання деталей до температури термічної обробки T_2 за заданий час τ .
2. За таблицею серії СНОЛ підібрати тип камерної електропечі опору з умовою $P_n \geq P_y$ і температурою $T_{\max} \geq T_2$.
3. Визначити глибину проникнення вихрового струму в метал при індукційному нагріванні за формулою Штейнметца.
4. На основі отриманої глибини проникнення h і діаметра деталі d оцінити режим нагрівання: якщо $d/h > 10$ - поверхневий нагрів; якщо $d/h < 4$ - наскрізний нагрів.
5. Зробити висновок: для якого типу термічної обробки (загартування, відпал, нормалізація) призначений розрахований режим і чому оптимальна вибрана частота струму.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електротермічне обладнання ремонтних підприємств АПК охоплює: камерні і шахтні електричні печі опору, установки індукційного нагрівання та зварювальне обладнання. Печі опору типу СНОЛ (від 15 до 1000 л) застосовують для термічної обробки деталей: загартування (800–900 °С), нормалізації (850–950 °С), відпалу (600–700 °С), відпуску (150–650 °С). Футерівка сучасних печей - легковагова вогнетривка цегла або керамічне волокно; нагрівальні елементи - ніхром Х20Н80 (до 1100 °С) або фехраль ОХ27Ю5А (до 1300 °С).

кінцева температура, t - час нагрівання, год, $\eta = 0,82-0,90$ - кКД печі. Встановлену потужність приймають $P_y = P_{роз}$ і підбирають СНОЛ так, щоб $P_n \geq P_y$.

Індукційне нагрівання - основний метод поверхневого загартування і швидкісного нагріву заготовок під пластичну деформацію. Глибина проникнення вихрового струму (формула Штейнметца): $h = 503 \cdot \sqrt{(\rho T / (\mu \cdot f))}$, м, де ρT - питомий опір металу при робочій температурі, Ом·м; μ - відносна магнітна проникність (для сталі вище точки Кюрі 770 °С $\mu = 1$; нижче $\mu = 20-200$); f - частота струму, Гц. Режим поверхневого загартування: $d/h > 10$; режим наскрізного нагріву: $d/h < 4$. Для поверхневого загартування сталевих виробів: $f = 30/d^2 \dots 60/d^2$ в (кГц), де d - діаметр, см.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1)

Вихідні дані: Сталь 45; $m = 15$ кг; $C = 0,502$ кДж/(кг·°С); $T_1 = 20$ °С; $T_2 = 850$ °С; $\tau = 1,5$ год; $\eta = 0,85$; $k_з = 1,15$; $d = 100$ мм = 0,10 м; $\rho T = 1,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; $\mu = 1$; $f = 1000$ Гц.

Крок 1. Розрахункова потужність печі:

$$P_y = k_з \cdot m \cdot C \cdot (T_2 - T_1) / (3600 \cdot \tau \cdot \eta) = 1,15 \cdot 15 \cdot 0,502 \cdot (850 - 20) / (3600 \cdot 1,5 \cdot 0,85)$$

$$P_y = 1,15 \cdot 15 \cdot 0,502 \cdot 830 / 4590 = 7193 / 4590 \approx 1,57 \text{ кВт}$$

Крок 2. Підбір печі СНОЛ:

Потрібна $P_n \geq 1,57$ кВт і $T_{max} \geq 850$ °С. За таблицею СНОЛ-15/12 ($P_n = 5$ кВт, $T_{max} = 1250$ °С, $V = 15$ л) ✓ - мінімальний підходящий типорозмір.

Крок 3. Глибина проникнення вихрового струму ($f = 1000$ Гц, $\mu = 1$ - вище точки Кюрі 770 °С):

$$h = 503 \cdot \sqrt{(\rho T / (\mu \cdot f))} = 503 \cdot \sqrt{(1,2 \cdot 10^{-6} / (1 \cdot 1000))}$$

$$h = 503 \cdot \sqrt{(1,2 \cdot 10^{-9})} = 503 \cdot 3,464 \cdot 10^{-5} = 1,74 \cdot 10^{-2} \text{ м} \approx 17,4 \text{ мм}$$

забезпечує нагрів заготовки під об'ємне загартування ($t_2 = 850 \text{ }^\circ\text{C}$) або під кування. Для поверхневого загартування деталі $d = 100 \text{ мм} = 10 \text{ см}$ потрібна частота f : $f > 30/d^2\text{в} = 30/10^2 = 0,3 \text{ кГц}$ - нижня межа, $f < 60/d^2\text{в} = 60/10^2 = 0,6 \text{ кГц}$ - верхня. Тому оптимальна $f = 400\text{--}500 \text{ Гц}$ для поверхневого загартування даного діаметра, а не 1000 Гц . При $f = 1000 \text{ Гц}$ глибина $h = 17,4 \text{ мм}$, що забезпечує рівномірний нагрів по всьому перерізу $d = 100 \text{ мм}$ - це наскрізний нагрів під кування.

Таблиця підбору. Технічні характеристики камерних печей опору СНОЛ (серія /12 - до $1250 \text{ }^\circ\text{C}$)

Модель СНОЛ	V, л	P, кВт	Tmax, $^\circ\text{C}$	U, В
СНОЛ-15/12	15	5	1250	380
СНОЛ-20/12	20	6	1250	380
СНОЛ-25/12	25	6	1250	380
СНОЛ-60/12	60	12	1250	380
СНОЛ-80/12	80	18	1250	380
СНОЛ-120/12	120	18	1250	380
СНОЛ-150/12	150	23	1250	380
СНОЛ-200/12	200	24	1250	380
СНОЛ-250/12	250	30	1250	380
СНОЛ-500/12	500	45	1250	380
СНОЛ-1000/12	1000	63	1250	380

Примітка: у 2024–2026 рр. моделі СНОЛ комплектуються мікропроцесорними ПД-регуляторами температури замість застарілих аналогових регуляторів. Точність підтримання температури $\pm 1\text{--}2 \text{ }^\circ\text{C}$. Нагрівальні елементи - ніхром Х20Н80 (до $1100 \text{ }^\circ\text{C}$) або ОХ23Ю5А (до $1250 \text{ }^\circ\text{C}$); азбестова ізоляція замінена сучасними керамічними волокнами.

ц – 20 порівняти глибину п з варіантом ц – 1.

Вар.	Матеріал	m, кг	C, кДж/(кг·°C)	T ₁ , °C	T ₂ , °C	τ, год	η	кз	d, мм	ρT·10 ⁻⁶ , Ом·м	μ	f, Гц
1	Сталь 45	15	0.502	20	850	1.5	0.85	1.15	100	1.2	1	1000
2	Сталь 45	20	0.502	20	900	2	0.85	1.15	80	1.2	1	2500
3	Сталь 20	10	0.49	15	800	1	0.88	1.1	120	1.1	1	500
4	Чавун	25	0.54	20	850	2.5	0.82	1.2	150	1.0	1	500
5	Сталь 45	30	0.502	15	900	3	0.85	1.15	60	1.2	1	8000
6	Сталь 40X	18	0.502	20	850	2	0.85	1.15	90	1.2	1	2500
7	Сталь 20	12	0.49	10	820	1.5	0.88	1.1	110	1.1	1	1000
8	Чавун	35	0.54	20	860	3	0.82	1.2	200	1.0	1	500
9	Сталь 45	8	0.502	20	870	1	0.85	1.15	75	1.2	1	2500
10	Сталь 40X	22	0.502	15	900	2	0.85	1.15	50	1.2	1	8000
11	Сталь 20	16	0.49	20	830	2	0.88	1.1	130	1.1	1	500
12	Чавун	28	0.54	15	850	2.5	0.82	1.2	180	1.0	1	500
13	Сталь 45	40	0.502	20	900	3.5	0.85	1.15	95	1.2	1	1000
14	Сталь 40X	14	0.502	10	870	1.5	0.85	1.15	70	1.2	1	2500
15	Сталь 20	20	0.49	20	820	2.5	0.88	1.1	140	1.1	1	500
16	Сталь 45	18	0.502	20	650	2	0.88	1.1	100	0.9	20	1000
17	Сталь 20	12	0.49	15	680	1.5	0.88	1.1	80	0.8	20	500
18	Сталь 45	25	0.502	20	700	2.5	0.88	1.1	120	0.9	20	1000
19	Сталь 40X	16	0.502	15	660	2	0.88	1.1	90	0.9	20	2500
20	Сталь 20	22	0.49	20	700	2.5	0.88	1.1	110	0.8	20	500
21	Сталь 45	10	0.502	10	650	1	0.88	1.1	70	0.9	20	1000
22	Сталь 40X	28	0.502	20	680	3	0.88	1.1	130	0.9	20	500

28	Сталь 40Х	24	0.502	20	680	2.5	0.88	1.1	115	0.9	20	500
29	Сталь 20	26	0.49	15	700	3	0.88	1.1	125	0.8	20	500
30	Сталь 45	38	0.502	20	660	3.5	0.88	1.1	140	0.9	20	500

Довідково: Точка Кюрі сталі ≈ 770 °С. При $T < 770$ °С: $\mu \gg 1$ (феромагнетик), h мала \rightarrow поверхневий нагрів легший. При $T > 770$ °С: $\mu = 1$ (парамагнетик), h зростає \rightarrow потрібна вища частота для поверхневого нагріву. Питома теплоємність: сталь $C = 0,490\text{--}0,502$ кДж/(кг·°С); чавун $C = 0,540$ кДж/(кг·°С).

Практична робота № 2.2

Тема: «Побутові електронагрівальні прилади. Розрахунок бойлера, добового споживання та оцінка пожежної безпеки»

ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати час нагрівання бака бойлера від θ_1 до θ_2 при заданій потужності та ккд.
2. Перевірити допустимість одночасного підключення приладів до однієї розетки (умова: сума потужностей ≤ 1700 Вт при 220 В). Визначити, чи виконується умова.
3. Розрахувати добову витрату електроенергії $W_{\text{доб}}$ (кВт·год) для заданого набору приладів при заданому часі їх роботи.
4. Визначити вартість електроенергії за місяць $B_{\text{міс}}$ (грн) при денному і нічному тарифах. Оцінити економію від перенесення нагрівання бойлера на нічний час.
5. Зробити висновок про безпечне використання приладів і доцільність нічного тарифу для бойлера.

електрична плита (конфорки 0,5–1,0 кВт), духовка шафа 1,0–2,0 кВт), камін/конвектор (0,8–1,25 кВт), масляний радіатор (0,5–1,25 кВт), мікрохвильова піч, індукційна плита. Нагрівальні елементи виконуються з ніхрому Х20Н80 або фехрально; ізоляція - периклаз, міканіт (азбест замінений в 2024–2026 рр.).

Час нагрівання бойлера: $\tau = V \cdot C_{\text{в}} \cdot (\theta_2 - \theta_1) / (3600 \cdot P \cdot \eta)$, год, де V - місткість бака, л ($\rho = 1$ кг/л); $C_{\text{в}} = 4,18$ кДж/(кг·°С); θ_1 і θ_2 - початкова і кінцева температури, °С; P - потужність ТЕНа, кВт; $\eta = 0,88\text{--}0,95$ - ккд водонагрівача. Для нічного режиму $\tau \leq 8$ год. Допустиме навантаження на одну розетку: не більше 1700 Вт при $U = 220$ В ($I_{\text{max}} = 1700/220 \approx 7,7$ А). Добова витрата електроенергії: $W_{\text{доб}} = \sum P_i \cdot t_i$, кВт·год. Вартість: $B = W_{\text{доб}} \cdot 30 \cdot T_{\text{тариф}}$, грн/міс.

Мікрохвильова піч (МХП) нагріває їжу НВЧ-полем частотою 2450 МГц. Поширена помилка у джерелах: вказано 245 МГц - це неправильно (у 10 разів менше). Стандартна частота ISM для МХП: 2450 МГц = 2,45 ГГц. Індукційна плита нагріває посуд вихровими струмами при частоті 20–60 кГц; ккд 85–90 % - значно вищий, ніж у традиційних плит (50–60 %). У 2024–2026 рр. в умовах зростання тарифів і нестабільного газопостачання індукційні плити стали пріоритетним вибором для сільських домогосподарств. Обов'язкова умова безпеки: сумарне навантаження на одну розетку не більше 1700 Вт; заземлення або занулення металевих корпусів через трижильний шнур.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1)

Вихідні дані: бойлер $V = 40$ л; $\theta_1 = 15$ °С; $\theta_2 = 85$ °С; $P = 1,25$ кВт; $\eta = 0,92$. Набір приладів: бойлер 1250 Вт + плита 800 Вт + камін 1000 Вт; сума 1250+800+1000 = 3050 Вт (три різні розетки); час роботи $t = 4$ год/добу для кожного. Тариф

він повністю вкладається - можна нагріти навіть 2 бакових цикли вночі.

Крок 2. Перевірка допустимості підключення:

Набір приладів за варіантом містить 3 прилади (бойлер 1250 Вт, плита 800 Вт, камін 1000 Вт = сума 3050 Вт). Якщо їх підключити до ОДНІЄ розетки - 3050 Вт > 1700 Вт - НЕДОПУСТИМО. При підключенні до різних розеток: бойлер 1250 Вт ≤ 1700 Вт ✓; плита 800 Вт ≤ 1700 Вт ✓; камін 1000 Вт ≤ 1700 Вт ✓ - кожен прилад окремо допустимий.

$$P_{\text{розетка}} = 1250 \text{ Вт (бойлер окремо)} < 1700 \text{ Вт } \checkmark$$

Крок 3. Добова витрата електроенергії (усі прилади t = 4 год/добу):

$$W_{\text{доб}} = (1,25 + 0,80 + 1,00) \cdot 4 = 3,05 \cdot 4 = 12,2 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$$

Крок 4. Вартість за місяць і економія від нічного тарифу для бойлера:

Якщо всі прилади працюють вдень (денний тариф):

$$B_{\text{ден}} = 12,2 \cdot 30 \cdot 4,32 = 1581 \text{ грн/міс}$$

Якщо бойлер перенести на нічний режим (τ_{ніч} = 2,83 год → нічний тариф; решта приладів - денний):

$$W_{\text{бойлер}_\text{ніч}} = 1,25 \cdot 2,83 = 3,54 \text{ кВт}\cdot\text{год/доб} \rightarrow B_{\text{бойлер}_\text{ніч}} = 3,54 \cdot 30 \cdot 2,16 = 229 \text{ грн/міс}$$

$$W_{\text{решта}_\text{ден}} = (0,80 + 1,00) \cdot 4 = 7,2 \text{ кВт}\cdot\text{год/доб} \rightarrow B_{\text{решта}_\text{ден}} = 7,2 \cdot 30 \cdot 4,32 = 933 \text{ грн/міс}$$

$$B_{\text{змішаний}} = 229 + 933 = 1162 \text{ грн/міс}$$

$$\text{Економія } \Delta B = 1581 - 1162 = 419 \text{ грн/міс } (\approx 26 \%)$$

Крок 5. Висновок: переведення бойлера на нічний режим заощаджує 419 грн/міс. Всі прилади підключені до окремих розеток - пожежна небезпека відсутня. Бойлер із магнієвим анодом потребує заміни анода кожні 2–3 роки для захисту баку від корозії.

Вар.	V, л	θ_1 , °C	θ_2 , °C	P_бойлера, кВт	η _бойлера	Сума потужн. приладів, Вт	Час роботи, год/добу	Прилади
1	40	15	85	1.25	0.92	1250	4	бойлер+плита+камін
2	80	10	85	2	0.9	2000	5	бойлер+конвектор
3	40	12	85	1.5	0.92	1700	3	бойлер+плита
4	50	15	85	1.25	0.92	1300	5	бойлер+камін
5	100	10	85	2.5	0.9	1800	4	бойлер+плита+обігрівач
6	60	12	85	1.25	0.92	1600	6	бойлер+конвектор
7	80	8	85	2	0.9	1500	4	бойлер+плита+радіатор
8	40	15	85	1.25	0.92	1250	5	бойлер+праска
9	120	10	85	2.5	0.9	2100	3	бойлер+плита+2 конвектори
10	50	12	85	1.5	0.92	1400	5	бойлер+камін
11	80	15	85	2	0.9	1600	4	бойлер+плита+обігрівач
12	40	8	85	1.25	0.92	1100	6	бойлер+конвектор
13	60	12	85	1.5	0.92	1900	4	бойлер+плита+обігрівач
14	100	15	85	2.5	0.9	1300	5	бойлер+конвектор
15	40	10	85	1.25	0.92	1500	4	бойлер+плита+камін
16	80	12	85	2	0.9	1800	5	бойлер+плита
17	50	8	85	1.5	0.92	1200	4	бойлер+обігрівач+камін
18	120	15	85	2.5	0.9	2200	3	бойлер+2 плити
19	40	10	85	1.25	0.92	1350	6	бойлер+конвектор
20	80	8	85	2	0.9	1700	4	бойлер+плита+радіатор
21	60	15	85	1.25	0.92	1550	5	бойлер+камін
22	100	12	85	2.5	0.9	2000	4	бойлер+плита+обігрівач
23	40	10	85	1.5	0.92	1250	5	бойлер+конвектор
24	80	8	85	2	0.9	1800	3	бойлер+плита+2 каміни
25	50	15	85	1.25	0.92	1400	6	бойлер+камін

та чи не перевищує сума всіх приладів дозволений струм групи (зазвичай $16 \text{ A} = 3520 \text{ Вт}$). Якщо сума перевищує 3520 Вт - потрібна окрема лінія. Зверніть увагу: для бойлера потужністю $\geq 1,5 \text{ кВт}$ в Україні у 2024–2026 рр. рекомендується підключення на виділену групу (окремий автомат) - ПУЕ, ДБН В.2.5-23:2010.

Практична робота № 2.3

Тема: «Основи електронно-іонної технології. Розрахунок джерела живлення ЕІТ-установки і параметрів коронного розряду»

ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати напругу холостого ходу U_{xx} (кВ) на виході схеми множення напруги для заданої кількості каскадів n і амплітудного значення напруги на вторинній обмотці трансформатора U_{2m} .
2. Розрахувати спад напруги ΔU під навантаженням і напругу на виході схеми $U_{вих}$ при заданому струмі навантаження I .
3. Обчислити напруженість електричного поля E_0 (МВ/м) на поверхні коронувального електрода, при якій виникає коронний розряд, за формулою Пікова (для повітря).
4. Визначити, чи достатня розрахована напруга $U_{вих}$ для підтримання коронного розряду між електродами з заданим радіусом r коронувального і між електродами на відстані $D = 10r$ (осаджувальний електрод).
5. Зробити висновок про придатність розрахованої схеми для заданого типу ЕІТ-установки, вказавши рекомендований діапазон напруги для кожного типу.

електричний пробій газу біля загостреного (коронувального) електрода при достатній напруженості поля. Початкова напруженість поля E_0 на поверхні коронувального електрода, при якій виникає стійкий коронний розряд у повітрі (формула Пікова):

$$E_0 = 30,31 \cdot (1 + 0,298/\sqrt{r}), \text{ МВ/м}$$

де r - радіус коронувального електрода, мм (ця формула діє при r у мм; E_0 у МВ/м). Для заданих E_0 і r напруга між коаксіальними електродами (радіуси r і D) при якій виникає коронний розряд: $U_{\text{корона}} = E_0 \cdot r \cdot \ln(D/r)$ (В), де r і D в однакових одиницях. Різні типи ЕІТ вимагають різних робочих напруг: аероіонізатори - 35–50 кВ; електрофільтри - 50–150 кВ; електросепаратори зерна - 30–80 кВ; електрофарбування - 60–140 кВ.

Джерело живлення ЕІТ-установок - схема множення напруги (каскадний генератор Кокрофта–Уолтона). Напруга холостого ходу: $U_{\text{хх}} = 2n \cdot U_{2\text{м}}$, де n - кількість каскадів; $U_{2\text{м}}$ - амплітуда напруги на вторинній обмотці. Напруга під навантаженням: $U_{\text{вих}} = 2n \cdot U_2 - \Delta U$, де $U_2 = U_{2\text{м}}/\sqrt{2}$ - діюче значення; спад напруги $\Delta U = I \cdot (4n^3 + 3n^2 + 2n)/(6 \cdot f \cdot C)$, де I - струм навантаження, А; f - частота, Гц; C - ємність конденсаторів, Ф. Номінальна напруга конденсаторів і зворотна напруга діодів: $\geq 2,85 \cdot U_2$. Безпека: ЕІТ-установки містять смертельно небезпечну напругу 30–150 кВ; обов'язкові блокування, заземлення та автоматичне розрядження конденсаторів після зняття напруги.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1 - Електрофарбування)

Вихідні дані: $n = 4$ каскади; $U_{2\text{м}} = 12\,000$ В; $f = 50$ Гц; $C = 0,10$ мкФ = $0,1 \cdot 10^{-6}$ Ф; $I = 2,0$ мА = $0,002$ А; $r = 1,5$ мм. Тип установки: електрофарбування (рекомендовано 60–140 кВ).

$$U_2 = U_{2m} / \sqrt{2} = 12\,000 / 1,414 = 8\,485 \text{ В}$$

$$U_{\text{вих}} = 2 \cdot n \cdot U_2 - \Delta U = 2 \cdot 4 \cdot 8\,485 - 20\,800 = 67\,880 - 20\,800 = 47\,080 \text{ В} \approx 47,1 \text{ кВ}$$

Крок 3. Напруженість E_0 при $r = 1,5$ мм:

$$E_0 = 30,31 \cdot (1 + 0,298/\sqrt{r}) = 30,31 \cdot (1 + 0,298/\sqrt{1,5}) = 30,31 \cdot (1 + 0,243) = 30,31 \cdot 1,243 = 37,7 \text{ МВ/м}$$

Крок 4. Напряга виникнення коронного розряду ($D = 10 \cdot r = 15$ мм):

$$U_{\text{корона}} = E_0 \cdot r \cdot \ln(D/r) = 37,7 \cdot 10^6 \cdot 0,0015 \cdot \ln(15/1,5) = 37,7 \cdot 10^6 \cdot 0,0015 \cdot \ln(10)$$

$$U_{\text{корона}} = 37,7 \cdot 10^6 \cdot 0,0015 \cdot 2,303 = 130\,314 \text{ В} \cdot \text{мм/м} \dots$$

Уточнення одиниць: $E_0 = 37,7 \text{ МВ/м} = 37,7 \cdot 10^6 \text{ В/м}$; $r = 1,5 \text{ мм} = 0,0015 \text{ м}$; $D = 0,015 \text{ м}$:

$$U_{\text{корона}} = 37,7 \cdot 10^6 \cdot 0,0015 \cdot \ln(10) = 56\,550 \cdot 2,303 = 130\,230 \text{ В} \approx 130 \text{ кВ}$$

Перевірка: $U_{\text{вих}} = 47,1 \text{ кВ} < U_{\text{корона}} = 130 \text{ кВ}$ - при розрахованому $U_{\text{вих}}$ коронний розряд у проміжку з $D = 15$ мм ще не виникає. Для отримання коронного розряду необхідно збільшити U_{2m} , збільшити n або зменшити D .

Крок 5. Висновок: $U_{\text{вих}} = 47,1 \text{ кВ}$ є нижньою межею діапазону електрофарбування (60–140 кВ) - недостатньо. Для отримання $U_{\text{вих}} \geq 60 \text{ кВ}$ з тими ж $n = 4$, $f = 50 \text{ Гц}$ і $C = 0,1 \text{ мкФ}$ необхідно збільшити U_{2m} до 15 000 В ($U_{\text{хх}} = 120 \text{ кВ}$, $U_{\text{вих}} \approx 82 \text{ кВ}$ ✓). Або збільшити n до 5–6 при тому ж U_{2m} . На практиці для електрофарбування застосовують 60–140 кВ з каскадами 4–6 і трансформаторами 12–20 кВ.

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

Для всіх варіантів: $f = 50 \text{ Гц}$; $D_{\text{осаджувального}} = 10 \cdot r$ (мм) - для розрахунку кроку 4. Рекомендовані діапазони $U_{\text{вих}}$: аероіонізатори - 35–50 кВ;

1	4	12000	50	0.1	2	1.5	Електрофарбування
2	3	15000	50	0.15	1.5	2	Електрофільтр
3	5	10000	50	0.08	2.5	1	Електросепаратор
4	4	12000	50	0.12	2	1.5	Аероіонізатор
5	3	15000	50	0.1	1.8	2	Електрофарбування
6	6	8000	50	0.08	3	0.8	Електрофільтр
7	4	10000	50	0.12	2	1.2	Електросепаратор
8	3	12000	50	0.15	1.5	1.8	Аероіонізатор
9	5	8000	50	0.1	2.5	1	Електрофарбування
10	4	14000	50	0.08	2	2	Електрофільтр
11	3	15000	50	0.12	1.8	1.5	Електросепаратор
12	5	10000	50	0.15	2.5	1	Аероіонізатор
13	4	12000	50	0.1	2	1.5	Електрофарбування
14	6	7000	50	0.08	3	0.8	Електрофільтр
15	3	14000	50	0.12	1.5	2	Електросепаратор
16	4	10000	50	0.15	2	1.2	Аероіонізатор
17	5	8000	50	0.1	2.5	1	Електрофарбування
18	3	15000	50	0.08	1.8	1.5	Електрофільтр
19	4	12000	50	0.12	2	1.5	Електросепаратор
20	6	8000	50	0.15	3	0.8	Аероіонізатор
21	3	14000	50	0.1	1.5	2	Електрофарбування
22	5	10000	50	0.08	2.5	1	Електрофільтр
23	4	12000	50	0.12	2	1.8	Електросепаратор
24	3	15000	50	0.15	1.8	1.5	Аероіонізатор
25	5	9000	50	0.1	2.5	1	Електрофарбування
26	4	13000	50	0.08	2	2	Електрофільтр
27	3	15000	50	0.12	1.5	1.8	Електросепаратор
28	6	7500	50	0.15	3	0.8	Аероіонізатор
29	4	11000	50	0.1	2	1.5	Електрофарбування

Практична робота № 2.4

Тема: «Електричні іонізатори повітря та обробка електричним струмом. Розрахунок електролізної установки для виробництва дезінфікуючого розчину»

ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати добову потребу у дезінфікуючому розчині з активним хлором $Q_{\text{хл}}$ (кг/добу) для заданого сільськогосподарського об'єкта.
2. Визначити добові витрати кухонної солі $M_{\text{солі}}$ (кг/добу) і електроенергії W (кВт·год/добу) для виробництва необхідної кількості активного хлору.
3. Розрахувати щоденний час роботи установки ЕДР (год/добу) при заданій потужності $P_{\text{ном}}$.
4. Визначити кількість завантажень (циклів) соляного розчину на добу, знаючи, що один цикл - це обробка $V = 20$ л розчину.
5. Порівняти отриманий час роботи з допустимим (не більше 20 год/добу) і зробити висновок: чи достатньо однієї установки ЕДР-0,1, чи потрібні дві.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Обробка електричним струмом в АПК охоплює широке коло практичних задач: виробництво дезінфікуючих розчинів методом електролізу, гальванічне відновлення деталей, передпосівна обробка насіння, електроплазмоліз рослинної сировини, розсолення ґрунтів, знезараження стічних вод. Об'єднує всі ці процеси використання хімічної або біологічної дії постійного чи змінного електричного струму на оброблювану речовину.

води, утворює хлорнуватисту кислоту HClO , остання реагує з NaOH і утворює NaOCl - активний дезінфектант. Питомі нормативні витрати: $a = 5,5\text{--}7,0$ кВт·год на 1 кг активного хлору; $b = 8\text{--}10$ кг кухонної солі на 1 кг активного хлору. Споживана потужність ЕДР-0,1: 350–600 Вт. Час роботи установки: $\tau_{\text{роб}} = W/P_{\text{ном}}$, год.

Передпосівна обробка насіння електричним полем промислової частоти (напруженість 1–4 кВ/см, тривалість 10–120 с) підвищує врожайність зернових на 10–20 % завдяки активізації фізико-хімічних реакцій в зародку насінини; витрати $\leq 0,2$ кВт·год/т. Мікрохвильова установка «Мікростим 1» (2 магнетрони по 1,5 кВт, частота 2450 МГц) дає продуктивність 900–1200 кг/год. Електроплазмоліз трави (60–75 кВ/м) прискорює природне сушіння у 1,3–2 рази, підвищує вміст каротину на 50 %; витрати 1,7–2,1 кВт·год/т. Розсолення ґрунту постійним струмом (1–10 А/м², 5–20 тис. кВт·год/га) прискорює меліорацію у кілька разів і вдвічі скорочує витрату прісної води - особливо актуально для деокупованих земель півдня України у 2024–2026 рр.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1 - Молочне відділення 100 корів)

Вихідні дані: $Q_{\text{хл}} = 200$ г/добу = 0,200 кг/добу; $P_{\text{ном}} = 450$ Вт = 0,450 кВт; $a = 6,25$ кВт·год/кг; $b = 9,0$ кг/кг; $V = 20$ л; $c = 5$ % (1 кг солі на 20 л).

Крок 1. Добова потреба в активному хлорі (дано у вихідних даних - 200 г/добу):

$$Q_{\text{хл}} = 0,200 \text{ кг/добу}$$

(Для довідки: норма хлору для дезінфекції молочного посуду ~ 200 мг/л; для 100 корів $\times 10$ л/добу посуду $\times 0,2$ г/л = 200 г/добу - значення реалістичне.)

Крок 2. Добові витрати солі і електроенергії:

Маса солі в одному завантаженні: $m_{цикл} = V \cdot c / 100 = 20 \cdot 5 / 100 = 1,03 \approx 1,03$ кг. Але за таблицею задано 1 кг на 20 л $\rightarrow m_{цикл} = 1,0$ кг.

$$N_{циклів} = M_{солі} / m_{цикл} = 1,80 / 1,0 = 1,8 \rightarrow \text{приймаємо 2 цикли/добу}$$

Крок 5. Перевірка: $\tau_{роб} = 2,78$ год/добу $\ll 20$ год/добу \checkmark - одна установка ЕДР-0,1 повністю забезпечує потребу молочного відділення на 100 корів з великим запасом. Установка виробляє за 1 годину: $P_{ном/a} = 0,450/6,25 = 0,072$ кг/год активного хлору; за добу при 24-годинній роботі - 1,73 кг, а потрібно лише 0,200 кг.

Висновок: Одна установка ЕДР-0,1 (450 Вт, 24 В) повністю вирішує задачу дезінфекції молочного відділення на 100 корів. Добові витрати: сіль - 1,80 кг, електроенергія - 1,25 кВт·год ($\approx 5,4$ грн при тарифі 4,32 грн/кВт·год). Перевага перед готовими реагентами: відсутність транспортування токсичного хлору, низька собівартість розчину.

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

Для всіх варіантів: $V = 20$ л (об'єм одного завантаження), концентрація солі 5 % (1 кг на 20 л). Маса солі в одному циклі: $m_{цикл} = 1,0$ кг. Умова достатності однієї установки: $\tau_{роб} \leq 20$ год/добу. Якщо $\tau_{роб} > 20$ год - встановити дві установки ЕДР-0,1 паралельно.

Вар.	$Q_{хл}$, г/доб	$P_{ном}$, Вт	a , кВт·год/кг	b , кг_солі/кг	V , л	$c_{солі}$, %	Об'єкт
1	200	450	6.25	9	20	5	Молочне відділення 100 корів
2	350	480	6	8.5	20	5	Свинарник 500 голів
3	150	400	6.5	9.5	20	5	Птахівник 1000 курей
4	500	550	5.8	8	20	5	Корівник 200 голів

10	450	520	5.9	8.2	20	5	Свинарник 800 голів
11	280	460	6.2	8.8	20	5	Птахівник 2000 курей
12	320	475	6.1	8.6	20	5	Телятник 80 голів
13	170	410	6.45	9.3	20	5	Молочне відділення 80 корів
14	550	560	5.8	8.1	20	5	Комплекс 500 свиноматок
15	230	440	6.3	9	20	5	Кролятник 500 голів
16	380	490	6.05	8.4	20	5	Молочний завод малий
17	140	395	6.55	9.6	20	5	Птахівник 800 курей
18	520	540	5.85	8	20	5	Корівник 250 голів
19	260	455	6.2	8.9	20	5	Свинарник 400 голів
20	420	510	5.95	8.3	20	5	Птахофабрика 3000 курей
21	190	430	6.35	9.1	20	5	Пастеризаційна лінія
22	360	485	6.08	8.5	20	5	Телятник 100 голів
23	160	405	6.5	9.4	20	5	Ветеринарна аптека
24	480	530	5.88	8.1	20	5	Молочна ферма 200 корів
25	220	445	6.28	8.9	20	5	Свинарник 300 голів
26	330	470	6.15	8.7	20	5	Птахівник 1500 курей
27	200	435	6.32	9	20	5	Кормоцех 200 свиней
28	440	515	5.92	8.2	20	5	Корівник 180 голів
29	270	458	6.22	8.8	20	5	Молочне відділення 120 корів
30	300	465	6.18	8.6	20	5	Телятник 60 голів

Довідково: Витрати на 1 кг активного хлору (2025 р.): електроенергія при тарифі 4,32 грн/кВт·год = $a \times 4,32$ грн; сіль при ціні ~8 грн/кг = $b \times 8$ грн. Порівняти з

Тема: «Електроімпульсна техніка і технологія. Розрахунок параметрів електрогідравлічної установки та електроогорожі»

ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати максимальну силу струму в розрядному колі I_{\max} (кА) при спрацюванні електрогідравлічної установки за заданими U_1 , C і L .
2. Визначити енергію, що накопичена в конденсаторній батареї W_c (кДж) при зарядженні до напруги U_1 .
3. Розрахувати площу ділянки загінного випасу S (га) за заданими довжиною $L_{ог}$ і шириною $Ш_{ог}$ електроогорожі.
4. Перевірити відповідність заданих параметрів огорожі вимогам безпеки: частота імпульсів 1–2 Гц, струм ≤ 150 мА, заряд $\leq 2,5$ мКл, напруга 2–10 кВ, тривалість ≤ 5 мс.
5. Зробити висновок: для якого технологічного процесу придатна розрахована енергія електрогідравлічної установки і чи забезпечує площа огорожі нормативну норму на одну тварину (ВРХ - 0,5–1 га/гол.).

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електроімпульсна техніка об'єднує три основні напрями: електрогідравлічні (ЕГЕ), магнітно-імпульсні (МІУ) та електроогорожі. Спільна основа - генератор імпульсів: підвищувальний трансформатор \rightarrow діод \rightarrow конденсаторна батарея $C \rightarrow$ комутатор (тиратрон, тиристор) \rightarrow навантаження. Зарядка конденсатора відбувається повільно, а розряд - за мікросекунди, що забезпечує колосальну миттєву потужність при відносно малій середній.

Максимальна сила струму при пробі в електрогідравлічній установці: I_{\max}

подрібнення добрив, обробка води і молока (бактерицидна дія ЕПЕ), заперування трубних з'єднань у ремонтному виробництві.

Електроогорожа для загінного випасу тварин - найбільш поширений споживач електроімпульсної техніки в АПК. Параметри безпеки (з ПУЕ і стандарту ІЕС 60335-2-76): частота імпульсів 1–2 Гц; тривалість ≤ 5 мс; амплітуда струму ≤ 150 мА; заряд в імпульсі $\leq 2,5$ мКл; напруга на лінії 2–10 кВ. Установка ЕІ-200: площа 4 га, довжина лінії 800 м, живлення від 4 батарей по 45 В або від мережі 220 В, потужність 11,5 Вт. Площа загону: $S = L_{ог} \cdot Ш_{ог} / 10\ 000$, га. У 2024–2026 рр. широко застосовуються сонячні генератори імпульсів для огорож на великих пасовищах - автономність на 3–5 сонячних діб.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1)

Вихідні дані: $U_1 = 50$ кВ = 50 000 В; $C = 100$ мкФ = $100 \cdot 10^{-6}$ Ф; $L = 5$ мкГн = $5 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_{ог} = 800$ м; $Ш_{ог} = 200$ м; тварини - ВРХ.

Крок 1. Максимальна сила струму:

$$I_m = 0,4 \cdot U_1 \cdot \sqrt{C/L} = 0,4 \cdot 50\ 000 \cdot \sqrt{(100 \cdot 10^{-6} / 5 \cdot 10^{-6})}$$

$$I_m = 0,4 \cdot 50\ 000 \cdot \sqrt{20} = 20\ 000 \cdot 4,472 = 89\ 443\ А \approx 89,4\ кА$$

Крок 2. Енергія в конденсаторній батареї:

$$W_c = C \cdot U_1^2 / 2 = 100 \cdot 10^{-6} \cdot (50\ 000)^2 / 2 = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 \cdot 10^9 / 2 = 125\ 000\ Дж = 125\ кДж$$

Крок 3. Площа загону:

$$S = L_{ог} \cdot Ш_{ог} / 10\ 000 = 800 \cdot 200 / 10\ 000 = 160\ 000 / 10\ 000 = 16\ га$$

Крок 4. Перевірка параметрів огорожі за нормами безпеки:

Установка ЕІ-200 (яка відповідає завданню): частота 1–2 Гц ✓; струм < 150 мА ✓ (< 700 мА за табл. 10.1 - нормативи); заряд $< 2,5$ мКл ✓ ($< 0,3$ мКл за табл.

Крок 5. Висновок. $W_c = 125$ кДж - відповідає діапазону потужних ЕПЕ-установок (1–300 кДж). При такій енергії установка придатна для подрібнення важкорозчинних добрив, очищення фільтрів свердловин, обробки стічних вод ферми. Площа 16 га для ВРХ при нормі 0,5–1 га/голову забезпечує випас 16–32 голів. Для ефективного загінного використання рекомендується ділити загін на 4–6 ротаційних ділянок по 2,7–4 га.

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

Для всіх варіантів: $I_m = 0,4 \cdot U_1 \cdot \sqrt{(C/L)}$; $W_c = C \cdot U_1^2 / 2$; $S = \text{Log} \cdot \text{Шог} / 10\ 000$.

Одиниці: U_1 - В; C - Ф; L - Гн; Log , Шог - м; S - га. Норма випасу: ВРХ - 0,5–1,0 га/гол.; свині - 0,08–0,15 га/гол.; вівці - 0,15–0,25 га/гол.

Вар.	U_1 , кВ	C , мкФ	L , мкГн	Log , м	Шог , м	Тварини
1	50	100	5	800	200	ВРХ
2	40	150	8	600	150	Свині
3	60	80	4	1000	250	ВРХ
4	35	200	10	500	120	Вівці
5	55	120	6	800	200	ВРХ
6	45	160	9	700	180	Свині
7	65	90	4	900	220	ВРХ
8	30	250	12	400	100	Вівці
9	50	140	7	750	180	ВРХ

16	62	85	4	950	240	ВРХ
17	33	230	12	450	115	Вівці
18	48	145	7	720	180	ВРХ
19	68	75	3	1100	280	ВРХ
20	38	195	10	550	138	Свині
21	56	110	5	820	205	ВРХ
22	44	165	9	680	170	Свині
23	32	240	12	420	105	Вівці
24	54	125	6	760	190	ВРХ
25	66	88	4	920	230	ВРХ
26	36	210	11	520	130	Вівці
27	46	150	8	660	165	Свині
28	64	95	4	880	220	ВРХ
29	40	175	9	580	145	Свині
30	72	70	3	1300	325	ВРХ

Критична примітка: у табл. 10.1 підручника вказана амплітуда струму < 700 мА - це помилкове значення. За стандартом ІЕС 60335-2-76 (на який спирається НПАОП 0.00-1.21-98) максимальний струм в імпульсі для електрогорожі - 150 мА, заряд - 2,5 мКл. У зразку виконання і висновках використовувати коректні значення 150 мА і 2,5 мКл. Стандарт ЄС EN 60335-2-76:2015 підтверджує ці норми, що важливо в умовах євроінтеграції України (2024–2026 рр.).

Практична робота № 2.6

Тема: «Ультразвукова техніка і технологія. Розрахунок параметрів ультразвукової установки для очищення деталей»

ЗАВДАННЯ

ванни з площею дна S.

4. Перевірити, чи відповідає розрахована інтенсивність діапазону кавітаційного очищення (2,5–10 Вт/см²) або більш потужного (> 10 Вт/см²). Визначити тип очищення.

5. Оцінити ефективність УЗ-очищення: порівняти залишок забруднень ($\leq 0,5$ %) з ручним (20 %), вібраційним (55 %) і прополіскуванням (88 %). Зробити висновок про застосовність для заданого об'єкта.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Ультразвук - механічні пружні коливання з частотою від $2 \cdot 10^4$ до 10^{10} Гц. В установках АПК переважно використовується діапазон 18–44 кГц. Головна перевага ультразвукового очищення - кавітація: в рідині у фазі розрідження утворюються порожнини, які змикаючись у фазі стиснення, створюють мікроударні хвилі з тиском до десятків МПа, що руйнують поверхневі плівки забруднення. Ефективність: при ручному очищенні залишається ~ 20 % забруднень, при вібраційному - 55 %, при прополіскуванні - 88 %, при УЗ - не більше 0,5 %.

Довжина хвилі: $\lambda = c/f$, де c - швидкість звуку в середовищі, м/с (у воді при 60 °C ≈ 1550 м/с; у сталі ≈ 5000 – 5900 м/с); f - частота, Гц. Інтенсивність ультразвуку: $I = 2 \cdot \rho \cdot c \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2$, Вт/м², де ρ - щільність середовища, кг/м³; A - амплітуда зміщення частинок, м. Для кавітаційного очищення: $I = 2,5$ – 10 Вт/см² = 25 000–100 000 Вт/м². При вищій інтенсивності - «потужне» очищення (видалення іржі, окалини, важких відкладень). Необхідна потужність установки: $P_{уст} = I \cdot S$, де S - робоча площа ванни, м².

Для ефективного кавітаційного очищення оптимальна температура

п'єзоелектричними перетворювачами на PZT-керамцї - ккд 90% проти 30–60% магнїтострикційних, широко застосовуються для очищення доїльної апаратури та молочного посуду.

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1 - Деталї ГРМ двигуна)

Вихідні дані: $\rho = 983 \text{ кг/м}^3$; $c = 1550 \text{ м/с}$; $f = 22 \text{ кГц} = 22\,000 \text{ Гц}$; $A = 5,0 \text{ мкм} = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $S = 0,10 \text{ м}^2$; $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$.

Крок 1. Довжина ультразвукової хвилі:

$$\lambda = c / f = 1550 / 22\,000 = 0,0705 \text{ м} \approx 70,5 \text{ мм}$$

Крок 2. Інтєнсивність ультразвуку:

$$I = 2 \cdot \rho \cdot c \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2$$

$$I = 2 \cdot 983 \cdot 1550 \cdot 9,870 \cdot (22\,000)^2 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^2$$

$$I = 2 \cdot 983 \cdot 1550 \cdot 9,870 \cdot 4,84 \cdot 10^8 \cdot 25 \cdot 10^{-12}$$

$$\text{Підетанно: } 2 \cdot 983 \cdot 1550 = 3\,047\,300; \times 9,870 = 30\,077\,400$$

$$\times 4,84 \cdot 10^8 = 1,46 \cdot 10^{16}; \times 25 \cdot 10^{-12} = 1,46 \cdot 10^{16} \cdot 2,5 \cdot 10^{-11} = 364\,800 \text{ Вт/м}^2 \approx 36,5$$

$$\text{кВт/м}^2$$

$$\text{Або: } 36,5 \text{ кВт/м}^2 = 3,65 \text{ Вт/см}^2$$

Крок 3. Потужність установки:

$$P_{\text{уст}} = I \cdot S = 364\,800 \cdot 0,10 = 36\,480 \text{ Вт} \approx 36,5 \text{ кВт}$$

Крок 4. Перевїрка режиму очищення:

$I = 3,65 \text{ Вт/см}^2$ - знаходиться в діапазонї кавітаційного очищення 2,5–10 Вт/см²

✓. Режим: стандартне кавітаційне очищення. Температура 65 °C - оптимальна (60–80 °C) ✓.

Крок 5. Ефективність і висновок:

УЗ-очищення забезпечує залишок забруднєнь $\leq 0,5 \%$ порівняно з 20 % при

маїстерень АПК рекомендується 9 31-1,0 (1,0 кВт), 18 кВт) або 9 33-0,25 (0,25 кВт) для малих ванн.

ВАРІАНТИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

Для всіх варіантів: $\lambda = c/f$; $I = 2 \cdot \rho \cdot c \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2$; $P = I \cdot S$. Кавітаційний режим: $I = 2,5-10$ Вт/см². Якщо $I > 10$ Вт/см² - потужний режим (видалення іржі, окалини).
Одиниці при розрахунку: всі у системі СІ; переводити кВт/м² в Вт/см² = поділити на 10.

Вар.	ρ , кг/м ³	c , м/с	f , кГц	A , мкм	S , м ²	T , °С	Об'єкт очищення
1	983	1550	22	5	0.1	65	Деталі ГРМ двигуна
2	983	1550	25	4	0.08	60	Вузли доїльної апаратури
3	983	1550	18	6	0.12	70	Підшипники
4	983	1550	30	3.5	0.06	65	Форсунки паливної апаратури
5	983	1550	22	5.5	0.15	60	Корпусні деталі
6	983	1550	25	4.5	0.09	65	Молочний посуд
7	983	1550	20	5	0.1	70	Шестерні редуктора
8	983	1550	28	3.8	0.07	60	Вузли гідравліки
9	983	1550	22	4.8	0.11	65	Деталі ГРМ двигуна
10	983	1550	24	5.2	0.13	60	Підшипники
11	983	1550	18	6.5	0.14	70	Корпусні деталі
12	983	1550	30	3.2	0.05	65	Форсунки паливної апаратури
13	983	1550	22	5	0.1	60	Вузли доїльної апаратури
14	983	1550	26	4.2	0.08	65	Молочний посуд
15	983	1550	20	5.8	0.12	70	Шестерні редуктора
16	983	1550	22	4.5	0.09	65	Деталі ГРМ двигуна
17	983	1550	24	5	0.11	60	Підшипники
18	983	1550	28	3.5	0.06	65	Форсунки паливної апаратури
19	983	1550	22	5.3	0.13	70	Корпусні деталі

26	983	1550	22	4.7	0.1	60	Вузли гідравліки
27	983	1550	24	5.1	0.11	65	Корпусні деталі
28	983	1550	28	3.8	0.07	70	Молочний посуд
29	983	1550	22	5.4	0.12	65	Вузли доїльної апаратури
30	983	1550	18	6	0.14	60	Шестерні редуктора

Довідково. Швидкість звуку у воді при 60 °С \approx 1550 м/с; щільність $\rho \approx$ 983 кг/м³.

Оптимальна температура очищення 60–80 °С. Ефективність методів: прополіскування - 12 % чистих, вібраційне - 45 %, ручне - 80 %, УЗ - 99,5 %.

Стандартний ряд УЗ-установок АПК: УЗУ-0,25 (0,25 кВт, 18 кГц), УЗГ-10-1,6 (1,6 кВт), УЗГ-2-4 (4 кВт), УЗГ-1-10/22 (10 кВт, 22 кГц).

Практична робота № 2.7

Тема: «Магнітна обробка матеріалів. Розрахунок установки магнітної обробки води для протинакипного захисту»

ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати об'ємну витрату води Q (м³/год) через кільцевий зазор апарата ПМУ за заданою швидкістю v , середнім діаметром $D_{\text{сер}}$ та шириною зазору δ .
2. Перевірити, чи виконуються умови ефективності магнітної обробки: напруженість $H = 88\text{--}143$ кА/м; швидкість $v = 0,4\text{--}1$ м/с; жорсткість води $\leq 12\text{--}14$ мг·екв/л.

4. Встановити, чи достатньо однієї секції апарата ПМУ-1 ($Q = 2-7$ м³/год), або потрібне паралельне включення двох.

5. Зробити висновок про придатність апарата ПМУ-1 для заданого об'єкта і умов. Визначити, для якої пори року ефект буде максимальним і чому.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Магнітна обробка матеріалів в АПК охоплює три практичні напрями: магнітна сепарація насіння і кормів, видалення металевих предметів зі шлунку ВРХ і магнітна обробка води для протинакипного захисту котлів та водонагрівачів. Всі три процеси засновані на різниці магнітних властивостей матеріалів: феромагнітні частинки (залізо, магнетит) притягуються до магніту, а немагнітні залишаються вільними.

Магнітна обробка води. При пропусканні жорсткої води через магнітне поле напруженістю $H = 88-143$ кА/м зі швидкістю $v = 0,4-1$ м/с у воді утворюються центри кристалізації $CaCO_3$. Надалі при нагріванні солі випадають у вигляді пухкого осаду (шламу) на дно котла, а не накипу на стінках. Це знижує витрату палива/електроенергії на нагрівання на 5-30 %. Умови ефективності: жорсткість $\leq 12-14$ мг·екв/л; час між обробкою і нагріванням $\leq 1-4$ год (центри кристалізації нестійкі); зазор апарата ≤ 10 мм. Апарат ПМУ-1: кільцевий зазор $\delta = 2,5$ мм; $H = 88-143$ кА/м; $v = 1-2$ м/с; $Q = 2-7$ м³/год.

Об'ємна витрата через кільцевий зазор: $Q = v \cdot \pi \cdot D_{\text{сер}} \cdot \delta \cdot 3600$, м³/год, де $D_{\text{сер}}$ - середній діаметр кільцевого зазору, м; δ - ширина зазору, м; 3600 - перетворення секунд в години. Важливе обмеження: загальноприйнятої теорії механізму дії магнітного поля на воду не існує, і частина науковців взагалі ставить саму можливість впливу під сумнів. Тому перед широким

ЗРАЗОК ВИКОНАННЯ (Варіант 1 - Водонагрівач 100 л)

Вихідні дані: $v = 1,0$ м/с; $H = 120$ кА/м; $D_{сер} = 80$ мм = 0,080 м; $\delta = 2,5$ мм = 0,0025 м; жорсткість = 8 мг·екв/л; $V_{котла} = 3,0$ м³/добу.

Крок 1. Об'ємна витрата:

$$Q = v \cdot \pi \cdot D_{сер} \cdot \delta \cdot 3600 = 1,0 \cdot 3,14 \cdot 0,080 \cdot 0,0025 \cdot 3600$$

$$Q = 1,0 \cdot 3,14 \cdot 0,080 \cdot 9,0 = 1,0 \cdot 2,260 = 2,26 \text{ м}^3/\text{год}$$

Крок 2. Перевірка умов ефективності:

$H = 120$ кА/м: знаходиться в діапазоні 88–143 кА/м ✓

$v = 1,0$ м/с: знаходиться в рекомендованому діапазоні 0,4–1 м/с ✓ (підручник дає 0,4–1 м/с; ПМУ-1: 1–2 м/с - правильно 0,4–2 м/с)

Жорсткість = 8 мг·екв/л ≤ 12–14 мг·екв/л ✓

Усі умови виконані - магнітна обробка буде ефективною.

Крок 3. Час роботи на добу:

$$\tau_{доб} = V_{котла} / Q = 3,0 / 2,26 = 1,33 \text{ год/добу} \approx 1 \text{ год } 20 \text{ хв}$$

$\tau_{доб} = 1,33$ год \ll 20 год ✓ - одна установка повністю забезпечує добову потребу.

Крок 4. Оцінка кількості секцій:

$Q = 2,26$ м³/год - знаходиться в діапазоні 2–7 м³/год для ПМУ-1 ✓. Достатньо однієї секції (або однієї установки ПМУ-1).

Крок 5. Висновок: Апарат ПМУ-1 придатний для захисту водонагрівача 100 л. Добова потреба 3,0 м³ забезпечується за 1 год 20 хв роботи. Максимальна ефективність очікується влітку: рослини поглинають СО₂ з ґрунтових вод, вода переносить її до С₂СО₃; істотає метаногенети центри інтестинальні. Влітку

Для всіх варіантів: $\delta = 2,5$ мм (стандарт ПМУ-1); формула $Q = v \cdot \pi \cdot D_{\text{сер}} \cdot \delta \cdot 3600$ (одиниці СІ: $D_{\text{сер}}$ і δ в м; v в м/с; Q в м³/год). Умови ефективності: $H = 88\text{--}143$ кА/м; $v = 0,4\text{--}1$ м/с (ПМУ-1: до 2 м/с); жорсткість ≤ 14 мг·екв/л.

Вар.	v, м/с	H, кА/м	D_сер, мм	δ , мм	Жорсткість, мг·екв/л	V_котла, м ³ /доб	Тип об'єкта
1	1	120	80	2.5	8	3	Водонагрівач 100 л
2	1.5	110	85	2.5	6	5	Парогенератор фермський
3	0.8	130	90	2.5	10	2.5	ЕНУ для поїлок 50 корів
4	1.2	125	80	2.5	7	4	Водонагрівач 200 л
5	0.5	140	95	2.5	12	1.5	Пастеризатор молока
6	1.8	100	85	2.5	5	6	Парогенератор великий
7	1	115	80	2.5	9	3.5	ЕНУ для поїлок 80 корів
8	1.3	128	90	2.5	8	4.5	Водонагрівач 150 л
9	0.7	135	85	2.5	11	2	Пастеризатор молока
10	1.6	105	80	2.5	6	5.5	Парогенератор фермський
11	1	122	90	2.5	8	3	Водонагрівач 100 л
12	0.9	132	85	2.5	10	2.8	ЕНУ для поїлок 60 корів
13	1.4	112	80	2.5	7	4.8	Водонагрівач 250 л
14	0.6	138	95	2.5	12	1.8	Пастеризатор молока
15	1.7	108	85	2.5	5	5.8	Парогенератор

19	1.5	107	80	2.5	8	3.2	фермський
20	1.1	123	90	2.5	8	3.8	Водонагрівач 120 л
21	0.7	136	85	2.5	10	2.4	ЕНУ для поїлок 55 корів
22	1.9	103	80	2.5	5	6.5	Парогенератор великий
23	1	119	90	2.5	9	3.4	Водонагрівач 130 л
24	1.3	124	85	2.5	7	4.3	ЕНУ для поїлок 90 корів
25	0.6	139	95	2.5	12	1.6	Пастеризатор молока
26	1.6	109	80	2.5	6	5.6	Парогенератор фермський
27	1	121	90	2.5	8	3.6	Водонагрівач 160 л
28	0.9	131	85	2.5	10	2.6	ЕНУ для поїлок 65 корів
29	1.4	113	80	2.5	7	4.6	Водонагрівач 220 л
30	0.5	141	95	2.5	13	1.4	Пастеризатор молока

Критична примітка: у підручнику 93505 вказано швидкість $v = 0,4 \dots 1$ м/с, а у КЛ для ПМУ-1 - $v = 1 \dots 2$ м/с. Реально ПМУ-1 розрахований на $v = 1-2$ м/с (тому $Q = 2-7$ м³/год при $\delta = 2,5$ мм і $D_{сер} \approx 80-100$ мм). Для апаратів з електромагнітом (типу апарата рис. 12.5) оптимальна $v = 0,4-1$ м/с. Студент повинен правильно класифікувати апарат при перевірці умови у кроці 2.

of working bodies of agricultural machines. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 28(2), 21-32. <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/2.2024.21>.

2. Stavinskiy, A., Vakhonina, L., Martynenko, V., Mardziavko, V., & Rudenko, A. (2025). Influence of electromagnetic radiation on the growth and productivity of agricultural crops in the agro-industrial complex. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 21(1), 59-75. <https://doi.org/10.31548/dopovidi/1.2025.59>.

3. Rudenko, A., Mardzyavko, V., Martynenko, V., & Kundenko, M. (2025). Research into the influence of the electromagnetic field on cell ion channels using modeling and measurement systems. *Radiotekhnika*, (222), 235–241. <https://doi.org/10.30837/rt.2025.3.222.24>.

4. Електротехнології в АПК : навч. посіб. / В. С. Шебанін, І. В. Бацуровська, В. І. Гавриш, В. А. Грубань ; за заг. ред. акад. В. С. Шебаніна. Миколаїв : МНАУ, 2022. 325 с.

5. Matvienko M. V., Martynenko V. O., Vakhonina L. V. Stress–Strain state of joints with a soft interlayer under mechanical loading. *International applied mechanics*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10778-023-01203-3>.

6. Calculation of optimal geometric parameters electrical apparatus for controlling the irrigation system / O. Sadovoy et al. *IEEE 5th international conference on modern electrical and energy system (MEES)*. 2023. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402456>.

7. Integration of CAD electrical machines and apparatuses with multiphysical modelling: an approach to matching electromagnetic and thermal models / L. Vakhonina et al. *Machinery & energetics*. 2026. Vol. 17, no. 1. P. 28–42. URL: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2026.28>.

10. Жидик І. А. Динамічні та структурні зрушення у виробництві електроенергії в Україні. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2024. Т. 1, № 105. С. 82–91.

11. Analysis of the state and problems of electricity development in Ukraine / O. Diachenko et al. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: hydraulic machines and hydraulic units*. 2024. No. 1. P. 83–87. URL: <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2024.1.12>.

12. Цифрові технології в АПК / В. Я. Григоренко та ін. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : матеріали VI міжнар. наук.-практ. інтернет-конференції*. 2024. С. 190–193.

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В АПК

Укладачі: **Мартиненко** Володимир Олександрович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 4,25.

Тираж 20 прим. Зам. № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету