

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

**Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В АПВ

**Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт
для здобувачів спеціальності G3 Електрична інженерія
денної і заочної форм навчання
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

УДК 631.3:621.3:621.365(076.5)
К 59

Укладачі:

Козін В. М., к. т. н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Савойський О. Ю., к. т. н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сіренко Ю. В., PhD, доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем

К 59 Електротехнології в АПВ :

Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт для здобувачів спеціальності G3 Електрична інженерія денної і заочної форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти [Електронне видання] / укл.: В. М. Козін, Савойський О. Ю., Ю. В. Сіренко. – Суми, 2026 – 172 с.

Методичні вказівки призначені для забезпечення здобувачів методичним матеріалом для виконання практичних робіт з дисципліни «Електротехнології в АПВ», а також вивчення, систематизації, розширення та закріплення теоретичних знань та застосування їх під час вирішення конкретних наукових, технічних, економічних та виробничих завдань.

Рецензенти:

Кравченко В. О., к. ф.-м. н., доцент кафедри енергетики електротехнічних систем СНАУ;

Івченко О. В., к. т. н., доцент, завідувач кафедри проектування технічних систем СНАУ.

Відповідальний за випуск:

Юрченко О. Ю., PhD, в. о. завідувача кафедри енергетики електротехнічних систем СНАУ.

Рекомендовано до видання Радою із забезпечення якості освітньої діяльності та якості вищої освіти інженерно-технологічного факультету.

Протокол № 6 від «14» травня 2026 року

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	4
1. Розрахунок електродного водонагрівача.....	6
2. Розрахунок водонагрівача непрямого нагріву.....	12
3. Розрахунок енергетичних параметрів системи підтримання мікроклімату.....	16
4. Розрахунок підлоги з електрообігрівом.....	30
5. Розрахунок енергетичних параметрів вакуумної електросушильної установки.....	36
6. Розрахунок енергетичних параметрів сублімаційної сушарки.....	49
7. Вибір електромеханічного обладнання електротеплової сушильної установки.....	61
8. Розрахунок енергетичних параметрів парокомпресійної холодильної машини.....	69
9. Розрахунок термоелектричної холодильної машини.....	78
10. Розрахунок електронагрівальної печі.....	88
11. Розрахунок установки індукційного нагрівання.....	104
12. Розрахунок і вибір зварювального трансформатора.....	117
13. Розрахунок джерела живлення установки електронно-іонної технології.....	124
14. Розрахунок електростатичного сепаратора для очищення та сортування насіннєвого матеріалу.....	134
Список літератури.....	145
Додатки.....	147

ВСТУП

Освітній компонент «Електротехнології в АПВ» посідає важливе місце у підготовці магістра з електричної інженерії, оскільки поєднує фундаментальні положення електротехніки, теплотехніки, електрофізики та електромеханіки з потребами реальних технологічних процесів агропромислового виробництва. Його вивчення спрямоване не лише на засвоєння окремих відомостей про електротехнологічні установки, а передусім на формування здатності аналізувати режими їх роботи, обґрунтовувати принципи побудови, оцінювати енергоефективність, надійність і доцільність використання у конкретних виробничих умовах. Саме тому методичні вказівки до практичних робіт мають розглядатися як інструмент інженерного опанування дисципліни, а не лише як збірник навчальних задач.

Практичні роботи з дисципліни покликані забезпечити перехід від теоретичного розуміння фізичних процесів до вміння виконувати прикладні розрахунки, працювати з технічними характеристиками обладнання, зіставляти варіанти технічних рішень і робити обґрунтовані висновки щодо їх експлуатаційної та енергетичної ефективності. У межах курсу здобувач стикається з різними за фізичною природою процесами – електронагріванням, сушінням, охолодженням, дією електричних полів, електронно-іонними явищами, електротехнологічною обробкою матеріалів, – однак саме розрахунковий підхід дає змогу побачити їх як взаємопов'язані складові сучасної інженерної практики. Така постановка навчання відповідає результатам навчання освітнього компонента, орієнтованим на аналіз, вибір, розрахунок і техніко-економічне обґрунтування електротехнологічних систем.

Особливе значення для майбутнього фахівця має опанування методики інженерного розрахунку. Саме в процесі виконання практичних робіт здобувач вчиться переходити від словесної постановки завдання до побудови розрахункової моделі, від вибору вихідних даних – до визначення ключових параметрів установки, від окремих формул – до системного тлумачення отриманих результатів. Така робота формує навички, які є визначальними для

подальшої професійної діяльності: уміння працювати з нормативно-довідковою інформацією, паспортними даними обладнання, схемами, технічними характеристиками та експлуатаційними обмеженнями. У результаті здобувач набуває здатності не просто відтворювати відомі залежності, а критично оцінювати технічне рішення у контексті конкретного виробничого об'єкта.

Важливою функцією практичних робіт є також формування інженерної культури оформлення результатів. Коректно виконана практична робота – це не лише правильний числовий результат, а й логічно побудований технічний документ, у якому чітко подано вихідні умови, обрані припущення, послідовність розрахунків, використані довідкові дані, аналіз одержаних значень і висновки. Для магістра це має принципове значення, адже подальша професійна діяльність передбачає розроблення пояснювальних записок, технічних звітів, аналітичних довідок, проєктних рішень і дослідницьких матеріалів, де важливими є не лише знання, а й уміння подати їх у професійно грамотній формі. Тому практичні роботи треба розглядати як елемент підготовки до реальної інженерної, наукової й проєктної комунікації.

Дані методичні вказівки охоплюють широкий спектр електротехнологічних процесів і установок, що застосовуються в агропромисловому виробництві, та створюють цілісне навчально-методичне середовище для систематизації, поглиблення та практичного застосування знань. Їх доцільно використовувати під час аудиторної роботи, самостійної підготовки, виконання індивідуальних завдань, підготовки до підсумкового контролю, а також як основу для подальших кваліфікаційних і дослідницьких розробок. Саме через таку послідовну роботу формується фахівець, здатний не лише знати електротехнологічні засоби, а й аргументовано обирати, розраховувати, адаптувати та впроваджувати їх у технологічні процеси агропромислового виробництва з урахуванням вимог енергоефективності, надійності, безпеки та технологічної доцільності.

Практична робота № 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОДНОГО ВОДОНАГРІВАЧА

Мета роботи: набути практичних навичок розрахунку основних параметрів електродного водонагрівача з трифазною електродною системою; навчитися визначати встановлену потужність нагрівача, геометричні розміри пластинчастих електродів і відстань між ними, а також перевіряти умови безпечної роботи електродної системи за допустимою напруженістю електричного поля та густиною струму у воді.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Електродне нагрівання є різновидом прямого нагрівання опором і застосовується для нагрівання матеріалів з іонною провідністю (вода, молоко, вологі корми).

Основною складовою частиною установки електродного нагрівання є електродна система, яка призначена для підведення напруги до матеріалу, що нагрівається. За конструкцією на напругою живлення розрізняють однофазні та трифазні електродні системи з плоскими та циліндричними електродами.

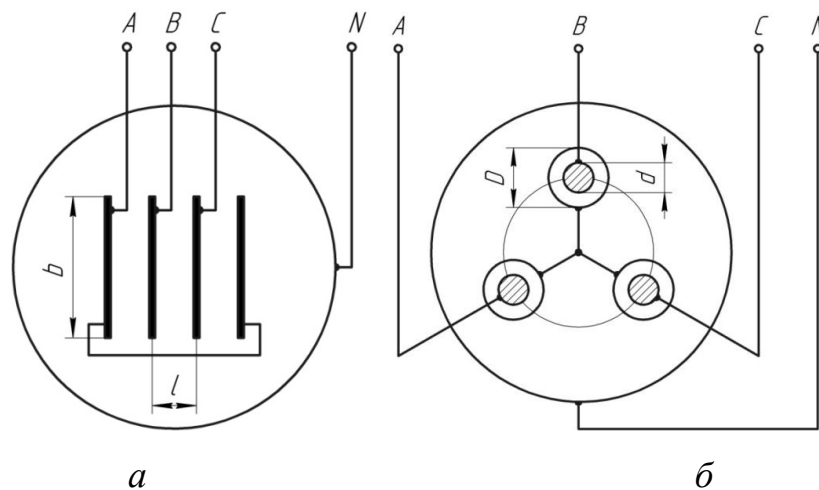


Рисунок 1.1 – Трифазні електродні системи з плоскими (а) та циліндричними (б) електродами: b – ширина пластини; l – відстань між пластинами; D, d – діаметри електродів

При розрахунках такі електродні системи представляють у вигляді електричних еквівалентних розрахункових схем. Електрична еквівалентна розрахункова схема трифазної електродної системи з плоскими електродами – це трифазна схема «трикутник», а трифазної електродної системи з циліндричними електродами – «зірка». В електродних водонагрівачах застосовується змінний струм, при використанні якого менше проявляється електроліз води. Для запобігання виникнення електролізу та електричного пробоя води густина струму та напруженість електричного поля між електродами не повинні перевищувати допустимих значень. Форму та взаємне розміщення електродів характеризує геометричний коефіцієнт електродної системи.

Для систем, наведених на рис. 1.1, його визначають так:

а) $k = \frac{l}{(n-1)b}$, де l – відстань між пластинами, см; n – кількість пластин; b

– ширина пластини, см;

б) $k = \frac{\pi l}{2} \ln \left(\frac{D}{d} \right)$, де D, d – діаметри коаксіальних електродів, см.

Особливістю електродного нагрівання води є те, що питомий опір води зменшується при її нагріванні. Тому виникає необхідність регулювання потужності електродного водонагрівача.

Основна задача розрахунку електродного водонагрівача полягає у визначенні параметрів електродної системи.

Електродними системами обладнуються електродні водонагрівачі типу ЕПЗ і електричні водогрійні та парові котли типу КЕВ та КЕПР відповідно.

ЗАВДАННЯ

Визначити потужність нагрівача води з трифазною електродною системою з пластинчатими електродами, геометричні розміри електродів та відстань між ними. Продуктивність водонагрівача $\dot{V}, \text{м}^3 / \text{год}$. Початкова температура нагрівання $t_1, ^\circ \text{C}$, кінцева $t_2, ^\circ \text{C}$.

Питомий опір води при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho_{20}=1000\text{Ом}\cdot\text{м}$. Номінальна напруга живлення водонагрівача $U_n=400\text{В}$. Допустима напруженість електричного поля між електродами $E_{\text{дон}}=12,5\text{кВ}/\text{м}$, допустима густина струму $j_{\text{дон}}=0,5\text{А}/\text{см}^2$. Питома теплоємність води $c=4,19\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Густина води $\rho=1000\text{кг}/\text{м}^3$. Коефіцієнт запасу k_3 . ККД нагрівача η .

Вихідні дані наведені у табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Вихідні дані до практичної роботи 1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\dot{V}, \text{м}^3/\text{год}$	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
$t_1, ^{\circ}\text{C}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_2, ^{\circ}\text{C}$	60	65	70	75	80	85	90	95	53	57	63
k_3	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12
η	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,96
Варіант	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$\dot{V}, \text{м}^3/\text{год}$	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28
$t_1, ^{\circ}\text{C}$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$t_2, ^{\circ}\text{C}$	68	72	78	83	88	93	55	58	66	76	86
k_3	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23
η	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85

ПРИКЛАД

Визначити потужність нагрівача води з трифазною електродною системою з пластинчатими електродами, геометричні розміри електродів та відстань між ними. Продуктивність водонагрівача $\dot{V}=0,12\text{м}^3/\text{год}$. Початкова температура нагрівання $t_1=10^{\circ}\text{C}$, кінцева $t_2=90^{\circ}\text{C}$.

Питомий опір води при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho_{20}=1000\text{Ом}\cdot\text{м}$. Номінальна напруга живлення водонагрівача $U_n=400\text{В}$. Допустима напруженість

електричного поля між електродами $E_{дон} = 12,5 \text{ кВ} / \text{м}$, допустима густина струму $j_{дон} = 0,5 \text{ А} / \text{см}^2$. Питома теплоємність води $c = 4,19 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$. Густина води $\rho = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3$. Коефіцієнт запасу $k_z = 1,15$. ККД нагрівача $\eta = 0,95$.

Розрахунок

Розрахунок параметрів електродного нагрівача води виконується за такою методикою:

1. Визначимо встановлену потужність електродного водонагрівача:

$$P_{вст} = \frac{k_z P_{кор}}{\eta},$$

де $P_{кор} = \rho \dot{V} c (t_2 - t_1)$ – корисне теплове навантаження.

Тоді

$$P_{кор} = 1000 \cdot \frac{0,12}{3600} \cdot 4,19 \cdot (90 - 10) = 11,23 \text{ кВт};$$

$$P_{вст} = \frac{1,15 \cdot 11,23}{0,95} = 13,6 \text{ кВт}.$$

2. Визначимо відстань між електродами:

$$l = \frac{U_{\phi}}{E_{дон}} = \frac{U_{л}}{E_{дон}} = \frac{U_{н}}{E_{дон}} = \frac{400}{12500} = 3 \text{ см}.$$

3. Задаємо ширину електрода $b = 5$ см (виходячи з розмірів робочої камери нагрівача) та визначимо геометричний коефіцієнт електродної системи:

$$k_z = \frac{l}{(n-1) \cdot b} = \frac{3}{(4-1) \cdot 5} = 0,2.$$

4. Визначимо висоту електрода за допомогою залежності:

$$P_{сер} = \frac{U_{\phi}^2 \cdot h}{k_z \cdot \rho_{сер}}$$

де $P_{сер}$ – середня потужність нагрівача за час нагрівання від температури t_1 до температури t_2 ;

$\rho_{сер}$ – питомий середній опір води при нагріванні її від температури t_1 до температури t_2 ,

$$\rho_{сер} = \frac{40\rho_{20}}{20 + t_{сер}};$$

$$t_{сер} = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

Тоді

$$h = \frac{P_{сер} k_z \rho_{сер}}{U_{\phi}^2},$$

де $P_{сер} = P_{вст} = 13,6 \text{ кВт}$; $U_{\phi} = U_n = 400 \text{ В}$; $k_z = 0,2$.

Отже,

$$t_{сер} = \frac{10 + 90}{2} = 50^\circ \text{ C};$$

$$\rho_{сер} = \frac{40 \cdot 1000}{20 + 50} = 570 \text{ Ом};$$

$$h = \frac{13,6 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 570}{400^2} = 11 \text{ см}.$$

Отже, електроди мають такі параметри:

– ширина електрода $b = 5 \text{ см}$;

– висота електрода $h = 11 \text{ см}$.

Відстань між електродами $l = 3 \text{ см}$.

5. Перевіримо, чи не буде виникати електроліз води. Для цього визначимо потужність водонагрівача та густину струму в кінці нагрівання, коли густина струму максимальна:

$$P_{t_2} = \frac{U_{\phi}^2 \cdot h}{k_z \cdot \rho_{t_2}},$$

$$\text{де } \rho_{t_2} = \frac{40\rho_{20}}{20 + t_2} = \frac{40 \cdot 1000}{20 + 90} = 364 \text{ Ом};$$

$$P_{t_2} = \frac{400^2 \cdot 11}{0,2 \cdot 364} = 22 \text{ кВт};$$

$$I_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{U_{\phi}},$$

де $P_{\phi} = \frac{P_{t_2}}{3}$.

Тоді

$$I_{\phi} = \frac{P_{t_2}}{3 \cdot U_{\phi}} = \frac{22 \cdot 10^3}{3 \cdot 400} = 19 \text{ A};$$

$$j_{t_2} = \frac{I_{\phi}}{S_{el}} = \frac{I_{\phi}}{b \cdot h} = \frac{19}{5 \cdot 11} = 0,35 \text{ A / cm}^2.$$

Оскільки $j_{t_2} = 0,35 \text{ A / cm}^2 < j_{дон} = 0,5 \text{ A / cm}^2$, то електроліз води виникати не буде.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає фізична сутність електродного нагрівання води?
2. Які матеріали або середовища можуть нагріватися методом електродного нагрівання?
3. Яке призначення електродної системи у водонагрівачі?
4. Які типи трифазних електродних систем застосовують в електродних нагрівачах?
5. Чому в електродних водонагрівачах використовують змінний, а не постійний струм?
6. Що характеризує геометричний коефіцієнт електродної системи?
7. Чому під час нагрівання води необхідно регулювати потужність електродного водонагрівача?
8. Як впливає температура води на її питомий електричний опір?
9. Для чого під час розрахунку перевіряють густину струму та напруженість електричного поля між електродами?
10. За якої умови в електродному водонагрівачі не виникатиме небажаний електроліз води?

Практична робота № 2

РОЗРАХУНОК ВОДОНАГРІВАЧА НЕПРЯМОГО НАГРІВУ

Мета роботи: набуття здобувачами освіти практичних навичок перевірного розрахунку електроводонагрівника періодичної дії, визначення потрібної теплової потужності для нагрівання заданого об'єму води за встановлений час, вибору кількості трубчастих електронагрівачів за заданою потужністю одного ТЕНа, а також оцінювання відповідності отриманих результатів технічним характеристикам серійних водонагрівачів.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Електроводонагрівачі непрямого нагріву забезпечують нагрівання будь-яких рідин, незалежно від їх електричних властивостей. До представників таких електроводонагрівачів відносять тип УАП, що належать до ємнісних водонагрівачів періодичної дії і призначені для нагрівання води, зокрема в агропромисловому виробництві. Існуючі моделі мають місткість 400, 800 і 1600 л та забезпечують нагрівання води до робочої температури близько 90 °С. Для цих моделей характерні номінальні потужності відповідно 12, 18 і 30 кВт.

Конструктивно водонагрівач УАП являє собою зварний резервуар із теплоізоляцією, нагрівальним блоком на основі ТЕНів і щитом керування. Для потужніших моделей ТЕНи можуть установлюватися у двох зонах резервуара – нижній і верхній, а кожною групою нагрівачів керує окремий термодатчик з термореле. Така побудова дає змогу забезпечити ступеневе або зональне керування нагріванням і зменшити нерівномірність температурного поля в об'ємі води.

Трубчастий електронагрівач – основний елемент електроводонагрівача – є металевою трубкою, всередині якої розміщена нагрівальна спіраль з високим електричним опором. Вона ізольована від оболонки електроізоляційним, але теплопровідним наповнювачем, як правило периклазом. ТЕНи виготовляють відповідно до EN 60335-1:2015, ГОСТ 19108-81 і ГОСТ 13268-88, а сама

номенклатура охоплює нагрівачі для електроводонагрівачів, котлів, професійного теплового обладнання та повітрянагрівачів.

Для серії УАП як штатні використовуються ТЕН-100В13/2П220, однак можна розглянути встановлення ТЕНів інших серій, розрахованих для роботи з водою.

ЗАВДАННЯ

Виконати перевірний розрахунок електроводонагрівника періодичної дії марки УАП. Потужність одного ТЕНа P_e .

Перепад температури води, яку нагрівають $\Delta\theta$, тривалість нагрівання τ .
Визначити загальну потужність і кількість ТЕНів.

Вихідні дані наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	Марка водонагрівача	Корисна місткість V , <i>л</i>	Потужність одного ТЕНа P_e , <i>кВт</i>	$\Delta\theta$, °C	τ , <i>год</i>
1	УАП-400/0,9	400	2,0	50	2,5
2	УАП-400/0,9	400	2,5	55	2,7
3	УАП-400/0,9	400	3,0	60	3,0
4	УАП-400/0,9	400	3,5	65	3,2
5	УАП-400/0,9	400	4,0	70	3,5
6	УАП-400/0,9	400	2,0	80	4,0
7	УАП-800/0,9	800	2,0	50	3,2
8	УАП-800/0,9	800	2,5	55	3,5
9	УАП-800/0,9	800	3,0	60	4,0
10	УАП-800/0,9	800	3,5	65	4,2
11	УАП-800/0,9	800	4,0	70	4,5
12	УАП-800/0,9	800	2,5	80	5,0
13	УАП-1600/0,9	1600	2,0	60	4,8
14	УАП-1600/0,9	1600	2,5	65	5,0

Продовження табл. 2.1

Варіант	Марка водонагрівача	Корисна місткість V , $л$	Потужність одного ТЕНа $P_e, кВт$	$\Delta\theta, ^\circ C$	τ , $год$
15	УАП-1600/0,9	1600	3,0	70	5,5
16	УАП-1600/0,9	1600	3,5	75	5,8
17	УАП-1600/0,9	1600	4,0	80	6,0
18	УАП-1600/0,9	1600	3,0	80	6,5
19	УАП-400/0,9	400	3,5	45	2,5
20	УАП-800/0,9	800	3,5	75	4,8
21	УАП-1600/0,9	1600	2,5	80	6,2
22	УАП-1600/0,9	1600	3,5	80	7,0

ПРИКЛАД

Виконати перевірний розрахунок електроводонагрівника періодичної дії УАП-1600/0,9-М1. Потужність одного ТЕНа $P_e = 3,5 кВт$.

Перепад температури води, яку нагрівають $\Delta\theta = 80 ^\circ C$, тривалість нагрівання $\tau = 6 год$. Визначити загальну потужність і кількість ТЕНів.

Розрахунок

Загальна потужність нагрівника періодичної дії

$$P = \frac{K_z \cdot \rho \cdot c \cdot V \cdot \theta}{3600 \cdot \eta \cdot \tau} =$$

$$= \frac{1,2 \cdot 1000 \cdot 4,19 \cdot 1600 \cdot 80}{3600 \cdot 0,96 \cdot 6} = 31037 Вт = 31,037 кВт,$$

де K_z – коефіцієнт запасу, 1,1–1,3;

V – об'єм води, $V = 1600 л$;

c – теплоємність води, $4,19 кДж/(кг \cdot K)$;

ρ – густина води, $\rho = 1000 кг / м^3$;

η – ККД, $\eta = 0,96$.

З довідкових даних вибираємо ТЕН-100В13/3,5Р220 з даними:

$l_a = 800 \text{ мм}; d = 13 \text{ мм};$ питома поверхнева потужність $P_{\Pi} = 9,86 \text{ Вт / см}^2$.

Площа активної поверхні ТЕНа

$$S_a = \pi \cdot d \cdot l_a = \pi \cdot 0,013 \cdot 0,8 = 0,0327 \text{ м}^2.$$

Допустима площа поверхні нагрівників

$$S = \frac{P \cdot 10^3}{P_{\Pi} \cdot 10^4} = \frac{31,037 \cdot 10^3}{9,86 \cdot 10^4} = 0,315 \text{ м}^2.$$

Кількість ТЕНів за умовою допустимого нагрівання

$$n = \frac{S}{S_a} = \frac{0,315}{0,0327} = 9,63.$$

Задаємося $n = 10$ шт.

Відповідно до довідкових даних на електроводонагрівнику періодичної дії УАП-1600/0,9-М1 встановлено ТЕНи загальною потужністю 30 кВт , що близько до отриманого під час розрахунку значення ($31,037 \text{ кВт}$).

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яке призначення електроводонагрівників періодичної дії типу УАП?
2. Чому за змістом цієї роботи йдеться про електроводонагрівник прямої дії, а не про класичний водонагрівач непрямого нагріву?
3. Які основні елементи конструкції має водонагрівач УАП?
4. Які фізичні величини входять до формули визначення загальної потужності водонагрівника?
5. Яку роль у розрахунку відіграє коефіцієнт запасу K_z ?
6. Чому під час розрахунку враховують ККД водонагрівника?
7. Як визначається кількість ТЕНів за відомої загальної потужності та потужності одного ТЕНа?
8. Для чого перевіряють допустиму площу поверхні нагрівників?
9. Чому для водяних і повітряних середовищ використовують різні типи ТЕНів?
10. За якими ознаками доцільно зіставляти результати розрахунку з паспортними характеристиками серійних водонагрівачів УАП?

Практична робота № 3

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ПІДТРИМАННЯ МІКРОКЛІМАТУ

Мета роботи: набути практичних навичок розрахунку енергоефективної системи підтримання мікроклімату для зимового кондиціювання повітря теплоутилізатором; навчитися визначати вентиляційну витрату повітря за тепловим, вологісним і газовим балансами, вибирати розрахункову витрату як найбільшу з отриманих значень, будувати процес обробки повітря у координатах $H-d$ та визначати параметри припливного повітря, теплове навантаження електрокалориферів і ефект теплоутилізації.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Підтримання нормативного мікроклімату в тваринницьких і птахівничих приміщеннях безпосередньо впливає на збереженість поголів'я, конверсію корму, продуктивність, ветеринарний стан і витрати енергії. На відміну від промислових, адміністративних і комунально-побутових будівель, у сільськогосподарських приміщеннях основними внутрішніми джерелами теплоти, вологи та газових домішок є не технологічне устаткування чи люди, а самі тварини або птиця, підстилка, послід, корми, напувалки та поверхні огорожень. Через це розрахунок повітрообміну тут ведуть не лише за тепловим комфортом, а обов'язково за вологістю та за виділенням шкідливих газів.

Типова система обробки повітря подана схемі (рис. 3.1 а) працює так: зовнішнє повітря станом H надходить у теплоутилізатор ТУ, де попередньо нагрівається теплотою витяжного повітря; далі на припливі проходить форсункову камеру ФК, де за потреби зволожується; потім у електрокалорифері КЛ підігрівається до потрібного стану і припливним вентилятором ВТп подається до приміщення. Із приміщення повітря станом Π видаляється через теплоутилізатор ТУ витяжним вентилятором ВТв. Така схема особливо доцільна для зимового режиму, коли мінімальний вентиляційний повітрообмін визначається біологічними вимогами до якості повітря, а тепловий дефіцит

покривається електрокалориферами з частковим поверненням (рекуперацією) теплоти витяжного повітря. Режим роботи системи кондиціювання, у першу чергу, погодозалежний, однак для теплових розрахунків систем кондиціювання вважають, що описані стани є рівноважними, а теплові процеси – стаціонарними.

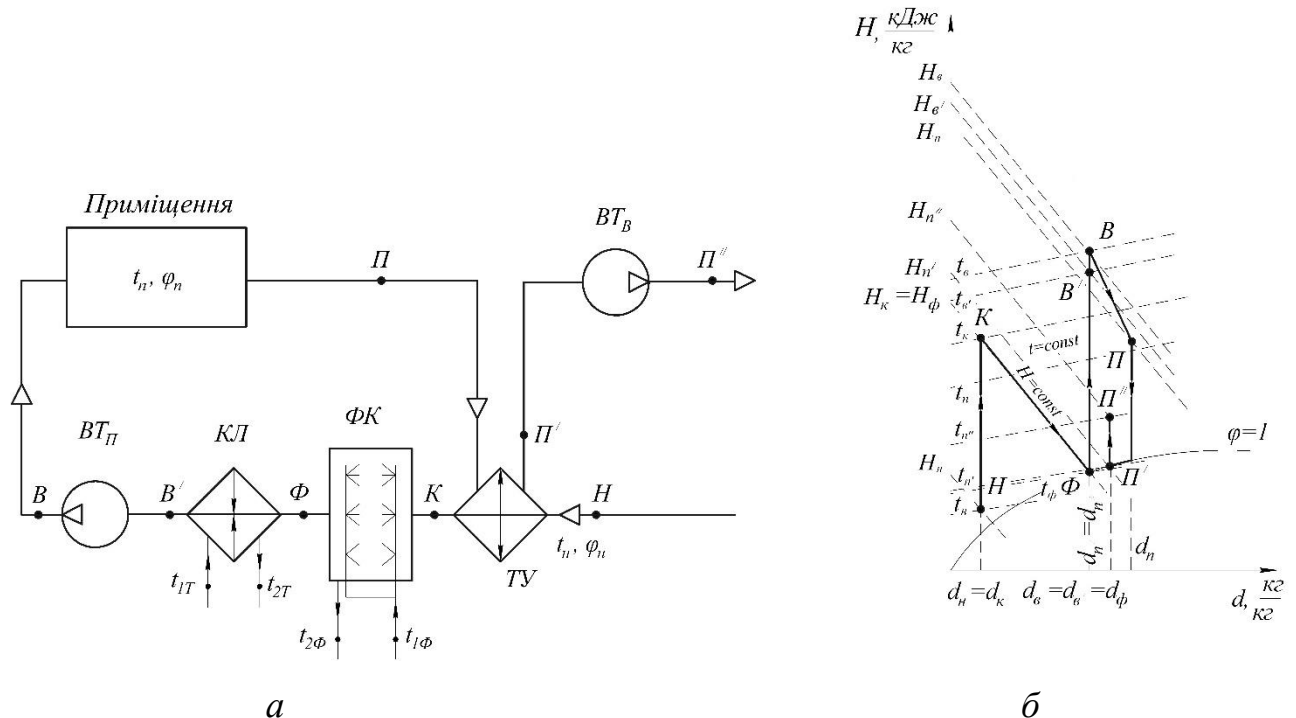


Рисунок 3.1 – Принципова схема (а) і цикл у H, d – діаграмі (б) системи кондиціювання з теплоутилізатором у холодний період

Для наочності, а також для спрощеного розрахунку системи кондиціювання часто користуються H, d – діаграмою вологого повітря (рис. 3.1 б) у якій вказують характерні точки (стани) на межах апаратів (вентилятори, теплообмінні апарати або кондиціонованого об'єму): Н – зовнішнє повітря; К – повітря після теплоутилізатора на припливі; Φ – повітря після форсункової камери; В' – повітря після електрокалорифера; В – повітря після припливного вентилятора ВТп, що подається у пташник; П – повітря в приміщенні; П' – витяжне повітря після теплоутилізатора; П'' – витяжне повітря після витяжного вентилятора ВТв.

Рекомендовані параметри мікроклімату типових сільськогосподарських приміщень наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Рекомендовані параметри мікроклімату типових сільськогосподарських приміщень

Приміщення	Температура, °С	Відносна вологість, %	Основні домішки, що контролюються
Корівник для дійних корів	8–12	60–75	CO ₂ , NH ₃ ; локально H ₂ S над гнойовими каналами
Свинарник на відгодівлі	16–20	60–75	NH ₃ , H ₂ S, CO ₂
Пташник для бройлерів (після брудерного періоду)	16–20	55–70	NH ₃ , CO ₂ , пил
Пташник для курей-несучок	16–18	55–70	NH ₃ , CO ₂ , пил

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

1. Вихідні психрометричні параметри

За заданими температурою t і відносною вологістю φ для зовнішнього та внутрішнього повітря на діаграмі H – d або за розрахунковими залежностями визначають вологовміст d та питому ентальпію H :

$$d = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{ws}(t)}{p_b - \varphi \cdot p_{ws}(t)};$$

$$H = 1,005 \cdot t + (2501 + 1,86 \cdot t) \cdot d,$$

де d – вологовміст, кг/кг сухого повітря;

H – ентальпія вологого повітря, кДж/кг сухого повітря;

$p_{ws}(t)$ – тиск насиченої водяної пари при температурі t , кПа;

p_b – барометричний тиск, кПа.

Для зимового проєктування кліматичні параметри зовнішнього повітря потрібно приймати за чинною будівельною кліматологією.

2. Вентиляційна витрата за тепловим балансом

Тепловий баланс приміщення у зимовий період записують за явною теплою:

$$Q_{яв.\Sigma} + Q_{доd} = Q_{огор} + Q_{вент} + Q_{инф},$$

де $Q_{яв.\Sigma}$ – сумарні явні тепловиділення в приміщенні (від тварин, обслуговуючого персоналу, освітлення, працюючого обладнання (технологічні) тощо), кВт;

$Q_{доd}$ – додаткова теплота від електрокалориферів, кВт;

$Q_{огор}$ – тепловтрати через огороження, кВт;

$Q_{вент}$ – теплота на нагрівання вентиляційного повітря, кВт;

$Q_{инф}$ – теплота на нагрівання інфільтрованого повітря, яке проникає через нещільності огорожуваних конструкцій, двері та ворота, кВт.

Сумарні явні тепловиділення від тварин або птиці:

$$Q_{яв.\Sigma} = N \cdot q_s,$$

де N – кількість голів;

q_s – явна теплота від 1 голови, кВт/гол або Вт/гол.

Тепловтрати через огороження тут подані у згорнутому вигляді:

$$Q_{огор} = K_{бyд} \cdot (t_{п} - t_{н})$$

де $K_{бyд}$ – зведений коефіцієнт тепловтрат будівлі, Вт/К; t

$t_{п}$ – температура повітря в приміщенні, °С;

$t_{н}$ – температура зовнішнього повітря, °С.

У реальному проєкті величина $Q_{огор}$ складається з тепловтрат через поверхні стін, покриття, підлоги, воріт, вікон.

Максимальна вентиляційна витрата, яку можна забезпечити лише за рахунок внутрішніх явних тепловиділень, становить:

$$L_Q = \frac{Q_{яв.\Sigma} - Q_{огор}}{\rho \cdot c_p \cdot (t_{п} - t_{н})},$$

де L_Q – витрата повітря за тепловим балансом, м³/с;

ρ – густина повітря, кг/м³;

c_p – питома масова ізобарна теплоємність повітря, кДж/(кг·К).

Якщо $Q_{яв.\Sigma} < Q_{огор}$, тоді тепловий баланс не забезпечує навіть мінімального повітрообміну без додаткового підігріву, і в цьому разі беруть L_Q , а дефіцит теплоти покривають електрокалориферами.

3. Вентиляційна витрата за вологісним балансом

Виділення вологи у приміщенні

$$W_{\Sigma} = G \cdot (d_{\Pi} - d_B),$$

де W_{Σ} – сумарне виділення вологи в приміщенні, кг/год;

G – масова витрата сухого повітря, кг/год;

d_{Π} – вологовміст повітря у приміщенні;

d_B – вологовміст припливного повітря.

Для попереднього вибору мінімальної витрати вентиляційного повітря за вологістю в зимовий період припливне повітря до зволожувача беруть за параметрами зовнішнього повітря, тобто $d_B \cong d_H$. Тоді

$$L_w = \frac{W_{\Sigma}}{\rho \cdot (d_{\Pi} - d_H)};$$

$$W_{\Sigma} = N \cdot w,$$

де L_w – вентиляційна витрата за вологісним балансом, м³/год;

w – виділення вологи однією головою, кг/год·гол.

Наприклад, для бройлерних пташників у зимовий період підвищення вологості критичне не тільки через комфорт, а й через стан підстилки, утворення аміаку та санітарний стан приміщення. Водночас чинні вимоги для бройлерів вимагають, щоб середня відносна вологість не перевищувала 70 % за холодної погоди.

4. Вентиляційна витрата за шкідливими речовинами

Для будь-якої домішки j баланс має вигляд:

$$L_j = \frac{G_j}{C_{j, \text{дон}} - C_{j, H}},$$

де L_j – потрібна витрата повітря, м³/год;

G_j – виділення домішки в приміщенні, мг/год або м³/год;

$C_{j,\text{don}}$ – допустима концентрація домішки у приміщенні (як правило беруть такою, що дорівнює ГДК шкідливої речовини);

$C_{j,H}$ – концентрація домішки у зовнішньому повітрі (для промотечійних схем і схеми з теплоутилізатором $C_{j,H} \cong 0$).

Для бройлерного пташника обов'язково перевіряють концентрації NH₃ і CO₂. Чинні українські вимоги встановлюють межі 20 ppm (0,002 % об.) для NH₃ і 3000 ppm (0,3 % об.) для CO₂ на рівні голів бройлерів. Для NH₃ зручно перейти до масової концентрації: при 20 °C і нормальному тиску 20 ppm приблизно відповідають 14,2 мг/м³. Для CO₂ баланс зручно вести в об'ємних частках:

$$L_{CO_2} = \frac{G_{CO_2}}{y_{CO_2,\text{don}} - y_{CO_2,H}},$$

де G_{CO_2} – виділення CO₂, м³/год;

$y_{CO_2,\text{don}}$ – допустима об'ємна концентрація CO₂ у приміщенні;

$y_{CO_2,H}$ – об'ємна концентрація CO₂ у довкіллі.

Для NH₃:

$$L_{NH_3} = \frac{G_{NH_3}}{C_{NH_3,\text{don}} - C_{NH_3,H}} = \frac{G_{NH_3}}{y_{NH_3,\text{don}} - y_{NH_3,H}}.$$

Для приміщень із гнойовими каналами або гнойосховищами під щільною підлогою додатково перевіряють H₂S:

$$L_{H_2S} = \frac{G_{H_2S}}{C_{H_2S,\text{don}} - C_{H_2S,H}} = \frac{G_{H_2S}}{y_{H_2S,\text{don}} - y_{H_2S,H}}.$$

Перерахунок концентрації, вираженої у ppm, у мг/м³ виконують за формулою:

$$C_{NH_3,\text{don}} = \frac{\text{ppm} \cdot M}{V_m},$$

де ppm – концентрація, виражена ppm;

M – молярна маса газу, г/моль;

V_m – молярний об'єм, л/моль, який визначають за виразом:

$$V_m = \frac{\mu R \cdot T}{p},$$

де μR – універсальна газова стала, $\mu R = 8,314 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$;

p – абсолютний тиск, Па;

T – абсолютна температура газу, К; $T = t + 273$.

У практичній роботі для бройлерного пташника вирішальними домішками приймають NH_3 і CO_2 ; H_2S розглядають як додаткову перевірку для інших типів тваринницьких приміщень.

5. Вибір розрахункової вентиляційної витрати

Розрахункову вентиляційну витрату приймають як найбільшу з трьох визначених значень:

$$L_{\text{вент}} = \max \left[L_Q, L_W, L_G \right],$$

$$\text{де } L_G = \max \left[L_{\text{NH}_3}, L_{\text{CO}_2}, L_{\text{H}_2\text{S}}, \dots \right].$$

Циркуляційну витрату повітря в циклі приймають рівною розрахунковій припливній витраті:

$$G = \rho \cdot L_{\text{вент}},$$

де G – масова витрата сухого повітря, кг/год або кг/с.

6. Побудова процесу на діаграмі H–d

6.1 Точки Н і П

На діаграмі за заданими t_H , φ_H наносять точку Н, а за t_P , φ_P – точку П.

6.2 Точка В – повітря, що подається в приміщення

Після вибору G стан припливного повітря перед приміщенням визначають з балансу вологи та явної теплоти для приміщення:

$$d_B = d_H - \frac{W_{\Sigma}}{G};$$

$$H_B = H_H - \frac{(Q_{\text{яв.}\Sigma} - Q_{\text{огор}}) \cdot 3600}{G}.$$

За відомими d_B і H_B на діаграмі знаходять точку В. Пряма В–П є променем тепловологісного процесу у приміщенні.

6.3 Точка К – після теплоутилізатора

Для сухого рекуперативного теплоутилізатора:

$$t_K = t_H + \eta_{TV} \cdot (t_{II} - t_H);$$

$$d_K = d_H;$$

$$H_K = H(t_K; d_K),$$

де η_{TV} – температурна ефективність теплоутилізатора.

Для витяжного повітря

$$t_{II'} = t_{II} - \eta_{TV} \cdot (t_{II} - t_H); \quad d_{II'} = d_{II}.$$

6.4 Точка Ф – після форсункової камери

У форсунковій камері зимового кондиціювання приймають адіабатичне зволоження:

$$H_\Phi = H_K.$$

Оскільки після форсункової камери повітря далі лише підігрівається, то

$$d_\Phi = d_B.$$

За відомими H_Φ і d_Φ на діаграмі знаходять точку Ф.

Якщо $d_B < d_K$, зволоження не потрібне і форсункову камеру на зимовому режимі можна відключити (байпасувати).

6.5. Теплова потужність електрокалорифера

$$Q_{KL} = \frac{G \cdot (H_B - H_\Phi)}{3600}.$$

6.6. Корисний ефект теплоутилізатора

$$Q_{TV} = \frac{G \cdot (H_K - H_H)}{3600},$$

або, якщо в рекуператорі відсутній перенос вологи,

$$Q_{TV} \approx \frac{G \cdot 1,005 \cdot (t_K - t_H)}{3600}.$$

ЗАВДАННЯ

Розрахувати систему підтримання мікроклімату бройлерного пташника в зимовий період за схемою з теплоутилізатором та електрокалорифером.

Для бройлерного пташника зимового періоду визначити:

- вентиляційну витрату повітря за тепловим балансом L_Q ;
- вентиляційну витрату повітря за вологісним балансом L_W ;
- вентиляційну витрату повітря за вмістом NH_3 та CO_2 ;
- розрахункову вентиляційну витрату $L_{\text{вент}}$;
- масову витрату сухого повітря G ;
- параметри повітря в точках Н, К, Ф, В, В', П, П', П'' на діаграмі Н-d;
- теплову потужність електрокалорифера $Q_{\text{кл}}$;
- тепловий ефект теплоутилізатора $Q_{\text{ту}}$.

Для розрахунку прийняти: $C_{\text{NH}_3.\text{дон}}=20$ ppm, $y_{\text{CO}_2.\text{дон}}=3000$ ppm, $y_{\text{CO}_2.\text{Н}}=420$ ppm, $C_{\text{NH}_3.\text{Н}} \approx 0$.

Інші вихідні дані взяти з табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані до завдання

Варі- ант	N, гол.	m, кг/ гол.	q _s , Вт/ гол.	w, $\frac{\text{г}}{\text{год} \cdot \text{гол}}$	G _{NH₃} , $\frac{\text{мг}}{\text{год} \cdot \text{гол}}$	G _{CO₂} , $\frac{\text{л}}{\text{год} \cdot \text{гол}}$	K _{буд} , Вт/К	t _п , °С	φ _п , %	t _н , °С	φ _н , %	η _{ту}
1	12000	1,4	4,6	5,6	12	1,6	1800	18	55	-20	85	0,50
2	12500	1,5	4,8	6,0	12	1,7	1850	18	55	-18	85	0,50
3	13000	1,5	4,8	6,0	13	1,7	1900	18	60	-17	80	0,52
4	13500	1,6	5,0	6,3	13	1,8	1950	18	60	-16	80	0,52
5	14000	1,6	5,0	6,3	14	1,8	2000	18	60	-15	80	0,55
6	14500	1,7	5,2	6,5	14	1,9	2100	17	60	-14	80	0,55
7	15000	1,8	5,4	6,8	15	1,9	2200	17	60	-13	80	0,58
8	15500	1,8	5,4	6,8	15	2,0	2250	17	65	-12	82	0,58
9	16000	1,9	5,6	7,0	16	2,0	2300	18	60	-11	82	0,60
10	16500	1,9	5,6	7,0	16	2,1	2350	18	60	-10	82	0,60
11	17000	2,0	5,8	7,3	17	2,1	2400	18	60	-9	82	0,62
12	17500	2,0	5,8	7,3	17	2,2	2450	18	65	-8	85	0,62
13	18000	2,1	5,9	7,6	18	2,2	2500	18	65	-7	85	0,65
14	18500	2,1	5,9	7,6	18	2,3	2550	19	60	-12	78	0,65
15	19000	2,2	6,1	7,9	19	2,3	2600	19	60	-14	78	0,66

Продовження табл. 3.2

Вари- ант	N , гол.	m , кг/ гол.	q_s , Вт/ гол.	w , $\frac{г}{год \cdot гол}$	G_{NH_3} , $\frac{мг}{год \cdot гол}$	G_{CO_2} , $\frac{л}{год \cdot гол}$	$K_{б\ddot{y}д}$, Вт/К	t_{II} , °C	φ_{II} , %	t_H , °C	φ_H , %	η_{TV}
16	19500	2,2	6,1	7,9	19	2,4	2700	19	60	-15	78	0,66
17	20000	2,3	6,2	8,1	20	2,4	2800	18	65	-16	80	0,68
18	21000	2,3	6,2	8,1	20	2,5	2900	18	65	-17	80	0,68
19	22000	2,4	6,4	8,4	21	2,5	3000	18	65	-18	82	0,70
20	23000	2,4	6,4	8,4	22	2,6	3050	17	65	-19	82	0,70
21	24000	2,5	6,5	8,5	23	2,6	3150	17	65	-20	85	0,70
22	25000	2,5	6,5	8,5	24	2,7	3200	17	65	-18	85	0,70

ПРИКЛАД

Розрахувати систему підтримання мікроклімату бройлерного пташника в зимовий період за схемою з теплоутилізатором, форсунковою камерою та електрокалорифером відповідно до вихідних даних: $N=16000$ голів; $m=1,9кг/гол$; $q_s=5,6Вт/гол$; $w=7,0г/(год \cdot гол)$; $G_{NH_3}=18мг/(год \cdot гол)$; $G_{CO_2}=2,0л/(год \cdot гол)$; $K_{б\ddot{y}д}=2500Вт/К$; $t_{II}=18^\circ C$; $\varphi_{II}=60\%$; $t_H=-5^\circ C$; $\varphi_H=85\%$; $\eta_{TV}=0,65$.

Для розрахунку задаємося: $C_{NH_3, \dot{d}on}=20$ ppm, $y_{CO_2, \dot{d}on}=3000$ ppm, $y_{CO_2, H}=420$ ppm, $C_{NH_3, H} \approx 0$.

Розрахунок

1. За діаграмою $H-d$ або за формулами визначаємо:

– для внутрішнього повітря II:

$$d_{II} = 7,7г/кг \text{ сух. пов.}; H_{II} = 37,59кДж/кг \text{ сух. пов.};$$

– для зовнішнього повітря H:

$$d_H = 2,1г/кг \text{ сух. пов.}; H_H = 0,21кДж/кг \text{ сух. пов.}$$

2. Вентиляційна витрата за тепловим балансом

Сумарні явні тепловиділення від птиці:

$$Q_{яв, \Sigma} = N \cdot q_s = 16000 \cdot 5,6 = 89600Вт = 89,6кВт.$$

Тепловтрати через огороження:

$$Q_{огор} = K_{бюд} \cdot (t_{II} - t_H) = 2500 \cdot (18 - (-5)) = 57500 \text{ Вт} = 57,5 \text{ кВт}.$$

Тоді

$$L_Q = \frac{Q_{яв.\Sigma} - Q_{огор}}{\rho \cdot c_p \cdot (t_{II} - t_H)} = \frac{89,6 - 57,5}{1,2 \cdot 1,005 \cdot (18 - (-5))} = 1,157 \text{ м}^3 / \text{с},$$

де ρ – густина повітря при нормальних технічних умовах ($p = 760 \text{ мм.рт.ст.} = 101325 \text{ Па}$ і $T = 20 + 273 = 293 \text{ К}$ – термодинамічні параметри, що визначають нормальні технічні умови ($p = 760 \text{ мм.рт.ст.}$; $t = 20^\circ \text{ C}$)

$$\rho = \frac{M \cdot p}{\mu R \cdot T} = \frac{0,029 \cdot 101325}{8,314 \cdot 293} = 1,2 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

де $M = 29 \text{ г} / \text{моль} = 0,029 \text{ кг} / \text{моль}$ – молярна маса повітря.

3. Вентиляційна витрата за вологісним балансом

Сумарне виділення вологи:

$$W_{\Sigma} = N \cdot w = 16000 \cdot 7 = 112000 \text{ г} / \text{год} = 112 \text{ кг} / \text{год}.$$

Тоді

$$L_w = \frac{W_{\Sigma}}{\rho \cdot (d_{II} - d_H)} = \frac{112}{1,2 \cdot (0,0077 - 0,0021)} = 16683 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

4. Вентиляційна витрата за шкідливими речовинами

4.1 За аміаком

Допустима концентрація:

$$C_{NH_3, доп} = 20 \text{ ppm} = \frac{\text{ppm} \cdot M}{V_m} = \frac{20 \cdot 17}{24,04} = 14,2 \text{ мг} / \text{м}^3,$$

де $V_m = \frac{\mu R \cdot T}{p} = \frac{8,314 \cdot 293}{101325} = 0,002404 \text{ м}^3 / \text{моль} = 24,04 \text{ л} / \text{моль}$ молярний об'єм

газу при нормальних технічних умовах ($p = 760 \text{ мм.рт.ст.}$; $t = 20^\circ \text{ C}$).

Сумарне виділення аміаку

$$G_{HN_3} = 16000 \cdot 18 = 288000 \text{ мг} / \text{год}.$$

Тоді

$$L_{NH_3} = \frac{G_{NH_3}}{C_{NH_3, доп} - C_{NH_3, H}} = \frac{288000}{14,2 - 0} = 20326 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

4.2 За вуглекислим газом

Сумарне виділення CO₂:

$$G_{CO_2} = 16000 \cdot 2,0 = 32000 \text{ л} / \text{год} = 32,0 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

Тоді

$$L_{CO_2} = \frac{G_{CO_2}}{y_{CO_2, доп} - y_{CO_2, H}} = \frac{32,0}{3000 \cdot 10^{-6} - 420 \cdot 10^{-6}} = 12403 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Отже, за газами визначальним є аміак:

$$L_G = \max \left[L_{NH_3} = 20326, L_{CO_2} = 12403 \right] = 20326 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

5. Вибір розрахункової вентиляційної витрати

$$L_{вент} = \max \left[L_Q = 1,157, L_W = 16683, L_G = 20326 \right] = 20326 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

Масова витрата сухого повітря:

$$G = \rho \cdot L_{вент} = 1,2 \cdot 20326 = 24391 \text{ кг} / \text{год}.$$

Отже, у цьому прикладі розрахункову вентиляцію визначає баланс за аміаком.

6. Точка В – повітря перед входом у приміщення

$$d_B = d_H - \frac{W_\Sigma}{G} = 0,0077 - \frac{112}{24391} = 0,0031 \text{ кг} / \text{кг} = 3,1 \text{ г} / \text{кг};$$

$$\begin{aligned} H_B &= H_H - \frac{(Q_{яв.\Sigma} - Q_{огор}) \cdot 3600}{G} = \\ &= 37,59 - \frac{(89,6 - 57,5) \cdot 3600}{24391} = 32,85 \text{ кДж} / \text{кг}. \end{aligned}$$

За діаграмою $H-d$ за координатами d_B та H_B знаходимо:

$$t_B = 24,8^\circ \text{ C}.$$

Отже, процес у приміщенні В–П супроводжується одночасним підвищенням ентальпії та вологовмісту повітря.

7. Точка К – після теплоутилізатора

$$t_K = t_H + \eta_{TV} \cdot (t_{II} - t_H) = -5 + 0,65 \cdot (18 - (-5)) = 9,95^\circ \text{ C} \approx 10^\circ \text{ C};$$

$$d_K = d_H = 2,12 / \text{кг} ;$$

$$H_K = H(t_K; d_K) = 15,29 \text{ кДж} / \text{кг} .$$

Для витяжного повітря після теплоутилізатора:

$$t_{II'} = t_{II} - \eta_{TV} \cdot (t_{II} - t_H) = 18 - 0,65 \cdot (18 - (-5)) = 3,05^\circ \text{C} ;$$

$$d_{II'} = d_{II} = 7,72 / \text{кг} .$$

8. Точка Ф – після форсункової камери

Оскільки , зволоження у форсунковій камері потрібне.

Задаємося

$$H_\Phi = H_K = 15,29 \text{ кДж} / \text{кг} ;$$

$$d_B = 3,12 / \text{кг} .$$

За діаграмою $H-d$:

$$t_\Phi = 7,5^\circ \text{C} .$$

Отже, у форсунковій камері повітря переходить із точки К у точку Ф по лінії майже сталої ентальпії.

9. Потужність електрокалорифера

$$Q_{KL} = \frac{G \cdot (H_B - H_\Phi)}{3600} = \frac{24391 \cdot (32,85 - 15,29)}{3600} = 119 \text{ кВт} .$$

10. Тепловий ефект теплоутилізатора

$$Q_{TV} = \frac{G \cdot (H_K - H_H)}{3600} = \frac{24391 \cdot (15,29 - 0,21)}{3600} = 102,2 \text{ кВт} .$$

Для бройлерного пташника за прийнятих умов найбільшою виявилася вентиляційна витрата, визначена за аміаком, тому $L_{\text{вент}} = 20326 \text{ м}^3 / \text{год}$. Після теплоутилізатора повітря нагрівається від -5°C до приблизно 10°C , у форсунковій камері зволожується до $d \approx 3,1 \text{ г/кг}$, а далі в електрокалорифері підігрівається до стану подачі в приміщення $t_B = 24,8^\circ \text{C}$. Необхідна потужність електрокалорифера становить близько 119 кВт, а ефект теплоутилізації – 102,2 кВт.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чим відрізняється розрахунок мікроклімату тваринницьких і птахівничих приміщень від розрахунку мікроклімату адміністративних або промислових будівель?
2. Які складові входять до теплового балансу пташника в зимовий період?
3. Які складові входять до вологісного балансу пташника?
4. Чому для зимового режиму вентиляційна витрата повітря не може визначатися лише за тепловим балансом?
5. Які шкідливі домішки є визначальними для бройлерного пташника?
6. За якою формулою визначають потрібну вентиляційну витрату за шкідливими газами?
7. Який фізичний зміст має точка К на діаграмі Н–d?
8. Який процес відбувається у форсунковій камері на ділянці К–Ф?
9. Як визначають теплову потужність електрокалорифера в зимовій системі кондиціювання?
10. Як впливає теплоутилізатор на енергетичну ефективність системи підтримання мікроклімату?

Практична робота № 4

РОЗРАХУНОК ПІДЛОГИ З ЕЛЕКТРООБІГРІВОМ

Мета роботи: набуття здобувачами освіти практичних навичок розрахунку електрообігрівальної підлоги для приміщень сільськогосподарського призначення, визначення площі локального обігрівання, питомої та встановленої потужності підлоги, вибору марки нагрівального проводу, кількості паралельних секцій, загальної довжини нагрівального елемента і кроку його укладання відповідно до виду тварин або птиці, параметрів мікроклімату та напруги живлення.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Електрообігрівальна підлога є одним із засобів місцевого електрообігрівання молодняку тварин і птиці та використовується для створення комфортної температурної зони без необхідності надмірно підвищувати температуру всього повітряного об'єму приміщення. Такий спосіб особливо доцільний для курчат, поросят та іншого молодняку, який найбільш чутливий до переохолодження саме в зоні контакту з підлогою. Загалом електрообігрівальна підлога розглядається як складова систем локального обігрівання і мікроклімату в тваринницьких та птахівничих приміщеннях.

Найпоширеніша конструкція такої підлоги передбачає безпосереднє замурування нагрівного проводу у бетонний шар. Конструктивно підлога містить утрамбований ґрунт, шар щебню, гідроізоляцію, теплоізоляцію, бетонну основу, нагрівний провід, захисну сітку та верхній бетонний шар. Для приміщень із живленням від мережі 400/230 В над нагрівними проводами встановлюють екрануючу сітку, яку приєднують до нульового проводу та контуру заземлення, що підвищує електробезпеку експлуатації.

Розрахунок електрообігрівальної підлоги проводять у певній послідовності. Спочатку визначають площу ділянки підлоги, яку потрібно обігрівати, за виразом

$$F = fN ,$$

де f – питома площа обігрівання однієї одиниці тварин або птиці;

N – їх кількість.

Далі визначають питому потужність підлоги як поверхневу густину теплового потоку, що залежить від коефіцієнта тепловіддачі підлоги, температури поверхні підлоги, температури повітря та ККД конструкції підлоги. Після цього знаходять загальну встановлену потужність обігрівання, потужність на одну фазу, кількість паралельних секцій, загальну довжину проводу на фазу, довжину однієї секції та крок укладання проводу. Для розрахунків беруть коефіцієнт тепловіддачі підлоги $\alpha = 10 - 13 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а ККД підлоги $\eta = 0,75 - 0,85$. Значення температури поверхні підлоги, питомої потужності, питомої площі обігрівання та рекомендованого кроку укладання проводу залежать від виду тварин або птиці. Наприклад, для добових курчат рекомендована температура підлоги становить $35 - 40^\circ \text{C}$, питома площа обігрівання – $0,015 - 0,017 \text{ м}^2$ на голову, а рекомендований крок укладання проводу – $0,05 - 0,1 \text{ м}$; для поросят-сисунів температура підлоги становить $25 - 30^\circ \text{C}$, а крок укладання – $0,1 - 0,15 \text{ м}$; для свиноматок температура підлоги становить $18 - 20^\circ \text{C}$, а крок – $0,15 - 0,2 \text{ м}$.

У підлогах такого типу застосовують спеціальні нагрівні проводи ПОСХВ, ПОСХП, ПОСХВТ та споріднені марки. Вони мають однопроволочну сталеву оцинковану жилу і спеціальну ізоляцію. Для проводу ПОСХВ характерна полівінілхлоридна ізоляція, для ПОСХП – поліетиленова. Дроти ПОСХВ і ПОСХП використовують саме для обігрівання підлоги в тваринницьких і птахівницьких приміщеннях, а також для обігрівання ґрунту в парниках і теплицях. На поліетиленову ізоляцію проводу ПОСХП негативно впливає сонячне випромінювання, тому цей провід доцільно застосовувати в підлозі та ґрунті, але не на відкритих ділянках без захисту.

Для молодняку тварин і птиці найкращі умови створюються за комбінованого обігрівання, коли тепла підлога поєднується з інфрачервоними опромінювачами.

ЗАВДАННЯ

Розрахувати електрообігрівальну підлогу для приміщення сільськогосподарського приміщення для заданої тварини (птиці) у кількості N . Температура повітря у приміщенні $\theta_{нов}$. Напруга живлення U . Нагрівальний елемент виконати на основі проводу заданої марки.

Вихідні дані для розрахунку наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до розрахунку

Варіант	Вид тварин або птиці	N , шт. гол./ гнізд/ станків	$\theta_{нов}$, °C	U , В	Марка проводу
1	Курчата добові	10000	23	230	ПОСХП
2	Курчата добові	12000	22	400	ПОСХВ
3	Курчата 30–40 діб	8000	21	400	ПОСХВТ
4	Курчата 60–70 діб	6000	18	230	ПОСХВ
5	Поросята-сисуни	40	18	230	ПОСХП
6	Поросята-сисуни	60	18	400	ПОСХВТ
7	Поросята 15–30 кг	50	18	400	ПОСХП
8	Поросята 15–30 кг	70	18	230	ПОСХВ
9	Поросята 30–45 кг	60	18	230	ПОСХВТ
10	Поросята 30–45 кг	80	18	400	ПОСХВ
11	Свиноматки	60	15	400	ПОСХП
12	Свиноматки	80	15	230	ПОСХВТ
13	Курчата добові	15000	20	230	ПОСХП
14	Курчата 30–40 діб	10000	21	400	ПОСХВ
15	Курчата 60–70 діб	7000	18	400	ПОСХВТ
16	Поросята-сисуни	70	18	230	ПОСХВ
17	Поросята 15–30 кг	90	18	230	ПОСХП
18	Поросята 30–45 кг	90	18	400	ПОСХВТ
19	Поросята-сисуни	80	18	400	ПОСХП

Продовження табл. 4.1

Варіант	Вид тварин або птиці	N , шт. гол./ гнізд/ станків	$\theta_{нов}$, °C	U , В	Марка проводу
20	Свиноматки	100	16	230	ПОСХВ
21	Свиноматки	120	15	400	ПОСХВТ
22	Курчата добові	20000	22	230	ПОСХВП

ПРИКЛАД

Розрахувати електрообігрівальну підлогу для курятника. Напруга живлення 400 В. Нагрівальний елемент виконати на основі проводу ПОСХП.

Вихідні дані:

- вид птиці – курчата добові;
- кількість – 10000 шт.;
- температура повітря $\theta_{нов} = 23$ °C.

Розрахунок

Визначаємо площу ділянки підлоги, яку треба обігрівати

$$F = f \cdot N = 0,016 \cdot 10000 = 160 \text{ м}^2,$$

де f – питома площа обігрівання (довідкові дані); для курчат добових $f = 0,016 \text{ м}^2 / \text{шт}$;

N – кількість одиниць тварин/птиці.

Питома потужність підлоги (поверхнева густина теплового потоку)

$$P_{нит} = \frac{\alpha \cdot (\theta_{нид} - \theta_{нов})}{\eta} = \frac{10 \cdot (37 - 23)}{0,8} = 175 \text{ Вт} / \text{м}^2,$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі підлоги ($\alpha = 7 - 13 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$); задаємося $\alpha = 10 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

η – ККД підлоги ($\eta = 0,75 - 0,85$); задаємося $\eta = 0,8$;

$\theta_{нид}$ – температура підлоги (довідкові дані); для курчат добових $\theta_{нид} = 37$ °C.

Визначаємо установлену потужність обігрівання підлоги

$$P = P_{\text{ном}} \cdot F \cdot 10^{-3} = 175 \cdot 160 \cdot 10^{-3} = 28 \text{ кВт}.$$

Визначаємо потужність на одну фазу

$$P_1 = \frac{P}{3} = \frac{28}{3} = 9,333 \text{ кВт}.$$

Кількість паралельних секцій, на які треба розподілити загальну довжину проводу однієї фази

$$Z = \frac{P_1}{U_\phi} \cdot \sqrt{\frac{r}{\Delta P}} = \frac{9333}{220} \cdot \sqrt{\frac{0,19}{12}} = 5,34,$$

де U_ϕ – фазна напруга;

r – опір одного метра проводу при робочій температурі (для ПОСХП – 0,19, для ПОСХВ – 0,174 Ом·м⁻¹);

ΔP – допустима потужність нагрівального проводу для ПОСХП – 12–13, для ПОСХВ – 9–10 Вт·м⁻¹).

Обираємо найближче більше ціле число $Z = 6$.

Потужність однієї секції на одну фазу

$$P_{1c} = \frac{P_1}{Z} = \frac{9333}{6} = 1556 \text{ Вт} = 1,56 \text{ кВт}.$$

Загальна довжина проводу на фазу

$$l = \frac{P_1}{\Delta P} = \frac{9333}{12} = 778 \text{ м}.$$

Довжина проводу однієї секції на одну фазу

$$l_1 = \frac{l}{Z} = \frac{778}{6} = 129,6 \text{ м}.$$

Крок укладання проводу

$$h = \frac{F}{n \cdot l} = \frac{160}{3 \cdot 778} = 0,069 \text{ м} = 69 \text{ мм}.$$

Отримане значення входить до рекомендованого для даного виду тварин/птих діапазону, що відповідно до довідкових даних (курчата добові) складає 0,05–0,1 м. Розрахунок завершено.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яке призначення електрообігрівальної підлоги у приміщеннях сільськогосподарського призначення?
2. Чому для молодняку тварин і птиці місцевий обігрів підлоги часто є ефективнішим, ніж лише загальний обігрів повітря?
3. Які основні конструктивні шари має електрообігрівальна підлога?
4. За якою формулою визначають площу підлоги, що підлягає обігріванню?
5. Від яких величин залежить питома потужність електрообігрівальної підлоги?
6. Для чого в розрахунку визначають кількість паралельних секцій нагрівного проводу?
7. Який фізичний зміст має крок укладання проводу і як він впливає на рівномірність обігрівання?
8. Чим відрізняються проводи ПОСХВ і ПОСХП за конструкцією та допустимим режимом роботи?
9. Чому при живленні від мережі 400/230 В у конструкції підлоги передбачають екрануючу сітку і заземлення?
10. За якими ознаками перевіряють, чи відповідає отриманий у розрахунку крок укладання проводу рекомендованим значенням для певного виду тварин або птиці?

Практична робота № 5
РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВАКУУМНОЇ ЕЛЕКТРОСУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Мета роботи: ознайомитися з фізичною сутністю процесу вакуумної сушки зерна, вивчити принцип дії вакуумної сушильної установки, навчитися виконувати спрощений технологічний розрахунок процесу сушіння зерна за матеріальним балансом вологи та визначати параметри циклічного режиму роботи вакуумного насоса.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Вакуумна сушка зерна є способом зневоднення, за якого волога видаляється із зернової маси в умовах зниженого тиску. Зменшення тиску в сушильній камері призводить до зниження температури кипіння води. Унаслідок цього випаровування вологи із зерна може відбуватися за порівняно низьких температур, що особливо важливо для насінневого матеріалу, оскільки надмірний нагрів часто знижує його схожість та енергію проростання.

Зерно завантажують у герметичний об'єм вакуумної камери, утворений двома коаксіально розміщеними вертикальними трубами 1 і 2 (рис. 5.1). Після увімкнення вакуумного насоса 4 тиск у камері знижують до 10–30 мм рт. ст. Якщо тиск у камері стає нижчим за тиск насичення водяної пари за температури атмосферного повітря, вода, що міститься у зерні та у міжзерновому просторі, починає інтенсивно випаровуватися. Утворена пара відкачується насосом і видаляється назовні. Тепло до зерна підводиться з навколишнього середовища – від атмосферного повітря та сонячного випромінювання.

Особливістю такого способу є поєднання двох процесів: з одного боку, унаслідок випаровування температура зерна знижується, а з іншого – до зерна підводиться тепло із довкілля. Це підтримує процес подальшого випаровування вологи. У певний момент у камері встановлюється режим, за якого кількість вологи, що випаровується, урівноважується можливостями її

відкачування вакуумним насосом. Саме тому продуктивність насоса та параметри довкілля істотно впливають на тривалість сушіння.

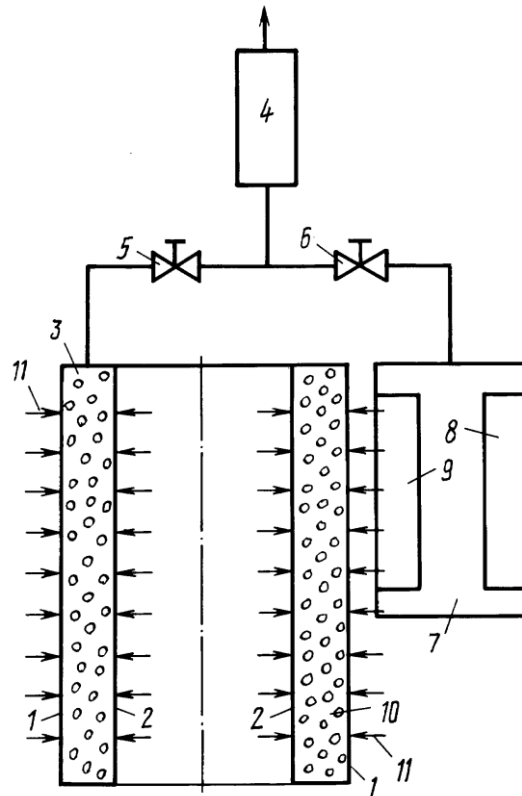


Рисунок 5.1 – Принципова схема вакуумного сушіння зерна:

- 1 і 2 – коаксіально розміщені вертикальні труби; 3 – герметичний простір камери; 4 – вакуумний насос; 5 і 6 – вентиль; 7 – холодильна машина; 8 – випарник холодильної машини; 9 – конденсатор холодильної машини; 10 – висушуваний матеріал (зерно); 11 – напрямок теплового потоку до зерна

За несприятливих погодних умов роботу вакуумного насоса доцільно переводити з безперервного у циклічний режим. При цьому насос вимикають за тиску на 1–3 мм рт. ст. вище мінімально допустимого, а вмикають за тиску на 1–3 мм рт. ст. нижче рівноважного, яке відповідає тиску насичення води за поточної температури атмосферного повітря. Такий режим дає змогу уникнути надлишкового зниження тиску і водночас підтримувати ефективне випаровування вологи.

Для інтенсифікації процесу в установці може додатково використовуватися холодильна машина 7. У такому випадку частина водяної пари конденсується на

поверхні випарника, а теплота, що відводиться конденсатором, спрямовується на додатковий підігрів зерна. Це сприяє підвищенню інтенсивності сушіння та зменшенню вимог до об'ємної продуктивності вакуумного насоса.

Перевагою вакуумної сушки є можливість видалення вологи за помірних температур, менші енерговитрати порівняно з багатоступеневими високотемпературними способами та збереження високих посівних властивостей зерна. У наданому документі наведено результати, які показують, що після вакуумної сушки схожість ячменю, пшениці та жита зберігалася на високому рівні.

Результати порівняльного аналізу схожості зерна після звичайного сушіння з нагріванням та після вакуумного сушіння наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати порівняльного аналізу схожості зерна

	Ячмінь		Пшениця		Жито	
	Схожість, %	Вологість, %	Схожість, %	Вологість, %	Схожість, %	Вологість, %
Початковий стан	95	—	98	—	82	—
Після сушіння з нагріванням	94,8	16,3	97,5	14,85	81,8	15,7
Після вакуумного сушіння	97,2	13,5	94,2	13,25	84,5	14

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

Для розрахунку вважають, що в процесі сушіння маса сухої речовини зерна не змінюється, а зменшення загальної маси зерна відбувається лише за рахунок видалення вологи.

Основні умовні позначення:

m_1 – початкова маса зерна, кг;

W_1 – початкова вологість зерна, %;

m_2 – маса зерна після сушіння, кг;

W_2 – кінцева вологість зерна, %;

m_c – маса сухої речовини, кг;

m_g – маса видаленої води, кг;

τ – тривалість сушіння, год;

t – температура довкілля, °C

G_g – середня продуктивність сушіння за вологою, кг/год;

$p_{\min}$ – мінімально допустимий тиск у камері, мм рт. ст.;

p_{eq} – рівноважний тиск, що відповідає тиску насичення водяної пари за температури атмосферного повітря, мм рт. ст.;

Δp – поправка для циклічного режиму, мм рт. ст.

Методика розрахунку установки вакуумного сушіння наведена нижче.

Маса сухої речовини зерна

$$m_c = m_1 \frac{100 - W_1}{100}.$$

Маса зерна після сушіння

$$m_2 = m_c \frac{100}{100 - W_2}.$$

Маса видаленої води

$$m_g = m_1 - m_2.$$

Середня продуктивність сушіння за вологою

$$G_g = \frac{m_g}{\tau}.$$

Зменшення вологості у відсоткових пунктах

$$\Delta W = W_1 - W_2.$$

Умова можливості інтенсивного випаровування води у вакуумній камері

$$p_{роб} < p_{eq}.$$

Для циклічного режиму роботи насоса приймають

$$p_{вим} = p_{\min} + \Delta p;$$

$$p_{вкл} = p_{eq} - \Delta p;$$

Для циклічного режиму роботи насоса середній робочий тиск можна приймати як середнє арифметичне між тиском вмикання і вимикання насоса

$$p_{роб} = \frac{p_{вкл} + p_{вим}}{2},$$

де $p_{роб}$ – середній робочий тиск у камері, мм рт. ст. або Па.

Тиск переводять з мм рт.ст. у Па за виразом

$$p_{роб, Па} = 133,32 p_{роб}.$$

Середню масову витрату вологи, що видаляється, визначають за формулою:

$$\dot{m}_e = \frac{m_e}{3600 \cdot \tau},$$

де $\dot{m}_e$ – масова витрата вологи, кг/с;

m_e – маса видаленої вологи, кг;

τ – тривалість сушіння, год.

Вакуумний насос відкачує переважно водяну пару. Тоді об'ємну витрату пари на вході в насос визначають за рівнянням стану ідеального газу:

$$L_n = \frac{\dot{m}_e}{M_e} \cdot \frac{\mu R \cdot T}{p_{роб, Па}},$$

де L_n – теоретична об'ємна витрата пари, м³/с;

$M_e = 0,018$ кг/моль – молярна маса водяної пари;

$\mu R = 8,314$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура водяної пари, К.

Розрахункова швидкодія вакуумного насоса

Оскільки в реальній установці насос відкачує не лише пару, але і незначну кількість повітря, а також мають місце витоки та нерівномірність процесу, вводять коефіцієнт запасу k_z

$$L_n = k_z L_n,$$

де L_n – потрібна номінальна швидкодія насоса, м³/с;

$$k_z = 1,3-1,8.$$

За наявності конденсатора або холодильної машини можна приймати менше значення k_z , а без попередньої конденсації пари – більше.

Теоретична потужність стискування

За умови наближеного ізотермічного стискування газу теоретична потужність насоса може бути оцінена виразом

$$N_m = p_{роб.Па} \cdot L_n \cdot \ln \left(\frac{p_{атм.Па}}{p_{роб.Па}} \right),$$

де N_m – теоретична потужність, Bm ;

$p_{атм.Па} = 101325 \text{ Па}$ – атмосферний тиск.

Електрична потужність приводу насоса

Електричну потужність двигуна насоса визначають з урахуванням сумарного ККД насоса і приводу:

$$N_{ел} = \frac{N_m}{\eta_{\Sigma}},$$

де $N_{ел}$ – електрична потужність двигуна, Bm або $кВт$;

η_{Σ} – сумарний ККД установки; для розрахунку задаються $\eta_{\Sigma} = 0,50 - 0,65$.

Витрата електроенергії на цикл сушіння

$$E_{ел} = N_{ел} \cdot \tau,$$

де $E_{ел}$ – витрата електроенергії за цикл сушіння, $кВт \cdot год$.

Питома витрата електроенергії:

– на 1 т вихідного зерна:

$$e_{1T} = \frac{1000 \cdot E_{ел}}{m_1};$$

– на 1 кг вихідного зерна:

$$e_{1T} = \frac{E_{ел}}{m_1};$$

– на 1 кг видаленої вологи:

$$e_{вл} = \frac{E_{ел}}{m_g}.$$

Показник $e_{вл}$ є найзручнішим для коректного порівняння різних способів сушіння, оскільки він безпосередньо пов'язаний із кількістю випареної води.

Рекомендації щодо вибору типу вакуумного насоса. Для процесу вакуумної сушки зерна насос повинен стабільно працювати з вологими газами і водяною парою. Саме тому для промислових та напівпромислових установок найбільш технологічно доцільними є водокільцеві вакуумні насоси. Такі

вакуумні насоси придатні для відкачування вологих газів і їх сумішей, газів, насичених парами, у тому числі водяною парою, а також газів що містять крапельну вологу.

Разом з тим для режимів із глибшим вакуумом, близьким до нижньої межі діапазону 10–30 *мм рт. ст.*, треба враховувати, що типові водокільцеві вакуумні насоси часто працюють до рівня близько 25–33 *кПа* (абс.), тобто приблизно 19–25 *мм рт. ст.* Тому якщо потрібно надійно підтримувати тиск, наприклад, близько 10–15 *мм рт. ст.*, доцільно розглядати або двоступеневу водокільцеву систему зі стадією конденсації, або маслозаповнений пластинчато-роторний насос з відокремлювачем конденсату.

Маслозаповнені пластинчато-роторні насоси здатні створювати значно глибший вакуум – у технічних характеристиках для одноступеневих моделей наведено 0,5–0,1 *кПа* (абс.), а типовий діапазон потужності електродвигуна становить 0,75–18,5 *кВт*. Для роботи з вологою парою бажано застосовувати виконання з газовим баластом або модифікації для підвищеного парового навантаження.

Отже, загальна рекомендація така: якщо установка працює безпосередньо з великою кількістю водяної пари і вимоги до глибини вакууму помірні, рекомендується водокільцевий насос (ВВН); якщо ж потрібно забезпечити більш глибокий вакуум у нижній частині діапазону 10–30 *мм рт. ст.*, доцільніше використовувати пластинчато-роторний насос (РПВН) із засобами захисту від конденсату. Додаткова стадія конденсації пари, яка прямо передбачена в базовому способі, зменшує навантаження на насос і покращує енергетичні показники установки.

Для високотемпературних зерносушарок у літературі наводять типовий сумарний показник енерговитрат 3,5–7,0 *МДж/кг* випареної води, що еквівалентно приблизно 1,1–2,2 *кВт·год/кг* видаленої вологи. Окремі сучасні установки можуть мати нижчі значення, але саме цей діапазон є типовим для гарячого повітря.

ЗАВДАННЯ

Виконати розрахунок енергетичних параметрів установки вакуумного сушіння зерна відповідно до вихідних даних.

У результаті виконання завдання **необхідно розрахувати:**

- 1) визначити масу сухої речовини зерна;
- 2) обчислити масу зерна після сушіння до заданої вологості;
- 3) знайти масу видаленої вологи;
- 4) визначити середню продуктивність сушіння за вологою;
- 5) за температурою атмосферного повітря встановити рівноважний тиск p_{eq} ;
- 6) для циклічного режиму визначити тиск вимикання та тиск вмикання вакуумного насоса;
- 7) визначити електричну потужність вакуумного насоса;
- 8) визначити витрати електроенергії на цикл сушіння;
- 9) визначити питомі витрати електроенергії;
- 10) зробити висновок щодо ефективності вакуумного режиму сушіння.

Вихідні дані взяти з табл. 5.2 відповідно до свого варіанту.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані до завдання

Варіант	Культура	m_1 , кг	W_1 , %	W_2 , %	τ , год	t , °C	Δp , мм рт. ст.	p_{eq} , мм рт. ст.	k_x	η_Σ	Тип вакуум- насоса*
1	Пшениця	600	20,0	14,0	2,5	20	2	17,5	1,40	0,55	РПВН
2	Ячмінь	750	21,0	14,0	2,8	22	2	19,8	1,40	0,55	РПВН
3	Жито	500	19,0	13,5	2,2	18	1	15,5	1,40	0,55	РПВН
4	Кукурудза	900	24,0	14,0	3,5	25	3	23,8	1,35	0,58	ВВН
5	Овес	650	18,0	13,0	2,4	17	1	14,5	1,40	0,55	РПВН
6	Пшениця	1000	22,0	14,0	3,0	24	2	22,4	1,35	0,58	ВВН
7	Ячмінь	850	20,0	13,5	2,7	23	2	21,1	1,35	0,58	ВВН
8	Жито	700	21,0	14,0	2,9	21	2	18,7	1,40	0,55	РПВН
9	Кукурудза	1200	26,0	15,0	4,0	28	3	28,3	1,30	0,60	ВВН
10	Овес	550	19,0	13,0	2,1	16	1	13,6	1,40	0,55	РПВН

Продовження табл. 5.2

Варіант	Культура	m_1 , кг	W_1 , %	W_2 , %	τ , год	t , °C	Δp , мм рт. ст.	p_{eq} , мм рт. ст.	k_x	$\eta \Sigma$	Тип вакуум- насоса*
11	Пшениця	1100	23,0	14,0	3,4	26	3	25,2	1,30	0,60	ВВН
12	Ячмінь	950	22,0	13,5	3,1	27	3	26,7	1,30	0,60	ВВН
13	Жито	800	20,0	14,0	2,8	24	2	22,4	1,35	0,58	ВВН
14	Кукурудза	1300	25,0	14,0	4,2	29	3	30,0	1,30	0,60	ВВН
15	Овес	600	18,0	13,0	2,3	19	2	16,5	1,40	0,55	РПВН
16	Пшениця	1400	24,0	14,5	4,1	30	3	31,8	1,30	0,60	ВВН
17	Ячмінь	1050	21,0	14,0	3,3	25	2	23,8	1,35	0,58	ВВН
18	Жито	900	22,0	14,0	3,0	22	2	19,8	1,40	0,55	РПВН
19	Кукурудза	1150	24,0	15,0	3,8	27	3	26,7	1,30	0,60	ВВН
20	Овес	700	19,0	13,5	2,6	20	2	17,5	1,40	0,55	РПВН
21	Пшениця	1250	23,0	14,0	3,7	28	3	28,3	1,30	0,60	ВВН
22	Ячмінь	780	20,0	13,5	2,7	18	1	15,5	1,40	0,55	РПВН

Примітка: * РПВН – ротаційно-пластинчатий вакуум-насос; ВВН – водокільцевий вакуум-насос

ПРИКЛАД

Вихідні дані: зерно – пшениця; $m_1 = 1000 \text{ кг}$; $W_1 = 22\%$; $W_2 = 14\%$;
 $\tau = 3,0 \text{ год}$; $t = 24^\circ \text{ C}$; $\Delta p = 2 \text{ мм.рт.ст.}$

Розрахунок

Рівноважний тиск, що відповідає тиску насичення водяної пари за температури атмосферного повітря $t = 24^\circ \text{ C}$ визначаємо з довідкових таблиць

$$p_{eq} = 22,4 \text{ мм.рт.ст.}$$

1. Визначаємо масу сухої речовини

$$m_c = m_1 \cdot \frac{100 - W_1}{100} = 1000 \cdot \frac{100 - 22}{100} = 780 \text{ кг}$$

2. Визначаємо масу зерна після сушіння

$$m_2 = m_c \cdot \frac{100}{100 - W_2} = 780 \cdot \frac{100}{100 - 14} = 906,98 \text{ кг}.$$

3. Знаходимо масу видаленої вологи

$$m_g = m_1 - m_2 = 1000 - 906,98 = 93,02 \text{ кг}.$$

4. Визначаємо середню продуктивність сушіння за вологою

$$G_g = \frac{m_g}{r} = \frac{93,02}{3,0} = 31,01 \text{ кг / год}.$$

5. Визначаємо зменшення вологості

$$\Delta W = W_1 - W_2 = 22 - 14 = 8\%.$$

6. Визначаємо параметри циклічного режиму насоса.

Мінімально допустимий тиск приймаємо

$$p_{\min} = 10 \text{ мм.рт.ст.}$$

Тиск вимикання насоса

$$p_{\text{вим}} = p_{\min} + \Delta p = 10 + 2 = 12 \text{ мм.рт.ст.}.$$

Тиск вмикання насоса

$$p_{\text{вкл}} = p_{eq} - \Delta p = 22,4 - 2 = 20,4 \text{ мм.рт.ст.}.$$

7. Для циклічного режиму роботи насоса середній робочий тиск можна приймати як середнє арифметичне між тиском вмикання і вимикання насоса

$$p_{\text{роб}} = \frac{p_{\text{вкл}} + p_{\text{вим}}}{2} = \frac{20,4 + 12}{2} = 16,2 \text{ мм.рт.ст.}$$

8. Перевіряємо умову ефективного сушіння

$$p_{\text{роб}} < p_{eq}$$

$$p_{\text{роб}} = 16,2 < p_{eq} = 22,4.$$

Оскільки тиск у робочій зоні циклу є нижчим за рівноважний тиск насичення водяної пари, умови для інтенсивного випаровування вологи забезпечуються.

Переводимо у паскалі

$$p_{\text{роб, Па}} = 133,32 p_{\text{роб}} = 16,2 \cdot 133,32 = 2159,8 \text{ Па}.$$

9. Визначаємо масову витрату вологи

$$\dot{m}_g = \frac{m_g}{3600 \cdot \tau} = \frac{93,02}{3600 \cdot 3,0} = 0,00861 \text{ кг / с}.$$

10. Визначаємо теоретичну об'ємну витрату водяної пари

Абсолютна температура

$$T = t + 273 = 24 + 273 = 297 K$$

тоді

$$L_n = \frac{\dot{m}_g}{M_g} \cdot \frac{\mu R \cdot T}{p_{роб.Па}} = \frac{0,00861}{0,018} \cdot \frac{8,314 \cdot 297}{2159,8} = 0,547 m^3 / c;$$

$$L_n = 3600 \cdot 0,547 = 1969,2 m^3 / год.$$

11. Визначаємо потрібну швидкість насоса

За наявності циклічного режиму та без окремого глибокого попереднього конденсатора приймемо коефіцієнт запасу $k_z = 1,3$

$$L_n = k_z L_n = 1,3 \cdot 0,547 = 0,711 m^3 / c;$$

$$L_n = 3600 \cdot 0,711 = 2559,9 m^3 / год.$$

12. Визначаємо теоретичну потужність стискування

$$\begin{aligned} N_m &= p_{роб.Па} \cdot L_n \cdot \ln \left(\frac{p_{атм.Па}}{p_{роб.Па}} \right) = \\ &= 2159,8 \cdot 0,711 \cdot \ln \left(\frac{101325}{2159,8} \right) = 5,91 \cdot 10^3 Bm = 5,91 kBm. \end{aligned}$$

13. Визначаємо електричну потужність двигуна

Для заданого типу вакуумного насосу задаємося його сумарним ККД $\eta_\Sigma = 0,55$

$$N_{ел} = \frac{N_m}{\eta_\Sigma} = \frac{5,91}{0,55} = 10,74 kBm.$$

Беремо найближче стандартне значення потужності електродвигуна:

$$N_{ог} = 11 kBm.$$

14. Визначаємо витрату електроенергії на цикл сушіння

$$E_{ел} = N_{ел} \cdot \tau = 10,74 \cdot 3,0 = 32,22 kBm \cdot год.$$

15. Визначаємо питому витрату електроенергії:

– на 1 т вихідного зерна

$$e_{1T} = \frac{1000 \cdot E_{ел}}{m_1} = \frac{1000 \cdot 32,22}{1000} = 32,22 kBm \cdot год / m;$$

– на 1 кг вихідного зерна

$$e_{1T} = \frac{E_{el}}{m_1} = \frac{32,22}{1000} = 0,0322 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{кг};$$

– на 1 кг видаленої вологи

$$e_{el} = \frac{E_{el}}{m_g} = \frac{32,22}{93,02} = 0,346 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{кг} \text{ видаленої вологи.}$$

Для високотемпературних зерносушарок у літературі наводять типовий сумарний показник енерговитрат 3,5–7,0 МДж/кг випареної води, що еквівалентно приблизно 1,1–2,2 кВт·год/кг видаленої вологи. Окремі сучасні установки можуть мати нижчі значення, але саме цей діапазон є типовим для гарячого повітря.

У прикладі для вакуумної сушки одержано

$$e_{el} = 0,346 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{кг} \text{ видаленої вологи.}$$

Для тієї ж кількості видаленої вологи $m_g = 93,02 \text{ кг}$ еквівалентні сумарні витрати енергії при тепловому сушінні становитимуть:

$$E_{тепл} = (1,1 - 2,2) \cdot m_g = (1,1 - 2,2) \cdot 93,02 = 102,3 - 204,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, в межах цього спрощеного навчального прикладу електрична енергія, що витрачається на роботу вакуумного насоса, є суттєво меншою за типовий сумарний енергетичний еквівалент теплового сушіння, а зниження становить орієнтовно 68–84 %. Такий результат пояснюється тим, що в базовому вакуумному способі значна частина теплоти для випаровування надходить із навколишнього середовища та сонячного випромінювання, а не від окремого паливного нагрівача.

Висновок. Під час вакуумної сушки 1000 кг пшениці з вологістю 22 % до вологості 14 % маса сухої речовини становить 780 кг, маса зерна після сушіння – 906,98 кг, а маса видаленої вологи – 93,02 кг. Середня продуктивність процесу за вологою дорівнює 31,01 кг/год. Для циклічного режиму вакуумного насоса доцільно прийняти вимикання за тиску 12 мм рт. ст. і вмикання за тиску 20,4 мм рт. ст.

Розрахункова електрична потужність вакуумного насоса становить 10,74 кВт, тому доцільно прийняти електродвигун потужністю 11 кВт. Витрата

електроенергії на цикл сушіння дорівнює $32,22 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, а питома витрата – $32,22 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{т}$ зерна або $0,346 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на 1 кг видаленої вологи. За сумарним енергетичним еквівалентом це менше, ніж для типового теплового сушіння зерна, однак за суто електричною складовою традиційні сушарки можуть мати нижчі значення, оскільки основна частина їхніх витрат припадає не на електроенергію, а на теплоту палива.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1 У чому полягає фізична суть вакуумного сушіння зерна?
- 2 Які основні переваги вакуумного сушіння зерна порівняно з конвективним?
- 3 Яке призначення вакуумного насоса у сушильній установці?
- 4 Чому у процесі вакуумного сушіння важливе підведення теплоти із довкілля?
- 5 За якої умови волога із зерна починає інтенсивно випаровуватися у вакуумній камері?
- 6 Чому масу сухої речовини в розрахунках беруть сталою?
- 7 Як визначити масу зерна після сушіння, якщо відомі початкова маса та початкова і кінцева вологість?
- 8 Як визначити масу вологи, що була видалена із зерна?
- 9 Що показує середня продуктивність сушіння за вологою?
- 10 Для чого вакуумний насос за несприятливих погодних умов переводять у циклічний режим?
- 11 Як визначають тиск вимикання та тиск вмикання вакуумного насоса?
- 12 Яку роль у процесі може виконувати холодильна машина?
- 13 Чому вакуумна сушка є доцільною для насіннєвого зерна?
- 14 Які фактори довкілля впливають на інтенсивність вакуумного сушіння зерна?

Практична робота № 6
РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
СУБЛІМАЦІЙНОЇ СУШАРКИ

Мета роботи: набути практичних навичок розрахунку основних технологічних і теплотехнічних параметрів сублімаційної сушарки для харчових продуктів; навчитися визначати тривалість періодів сублімації та досушування, загальну тривалість циклу сушіння, теплові навантаження на нагрівачі, витрату теплоносія, кількість вологи, що видаляється, а також основні характеристики кріоконденсатора (десубліматора) в умовах вакуумного сушіння.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Метод сублімації сушіння харчових продуктів заснований на здатності льоду за певних умов випаровуватися, міняючи рідку фазу, тобто сублімувати.

Суть сублімаційного сушіння полягає у сублімації льоду (води, що перетворилася у кристали льоду) при тиску пари навколишнього середовища нижче потрійної точки. Така сублімація льоду у пару сприяє збереженню форми продукту, що висушується. Зморщування продукту, що спостерігається при тепловому сушінні, не відбувається, і продукт після сушіння зберігає свої лінійні розміри. При заводненні такого продукту вода швидко заповнює пори, звідки під час сушіння було сублімовано лід, і продукт швидко відновлюється. Висушені методом сублімації продукти зберігають свої вихідні якості, екстрактивні речовини, ферменти і вітаміни.

Сушіння сублімаційним методом обходиться дорожче теплового, тому сублімації доцільно піддавати лише ті продукти, які неможливо без явної втрати якості висушити методом теплового сушіння. До них відноситься, наприклад, сири, при сушінні яких тепловим способом отримують явно неякісний продукт, або м'ясо шматочками, яке також неможливо отримати тепловим сушінням без втрати якості. Методом сублімації також доцільно сушити цілі плоди і ягоди.

Сушку цим методом здійснюють у спеціальному апараті – субліматорі, що є герметичною посудиною, що може періодично відчинятися, в якій розміщені

полки з розсипаним або розкладеним на них продуктом, до полиць з допомогою різних пристроїв підводиться теплота.

Установка для сушіння харчових продуктів сублімацією (рис. 6.1) складається з сушильної камери 1, конденсатора 2, форвакуумного насоса 3, холодильного компресора 4 (з допоміжним обладнанням), а також обладнання для підготовки гарячої води та подачі її в плити камери.

Сушильну камеру (субліматор) виготовляють зі сталевих листів. Вона має прямокутну або циліндричну форму, зручну для завантаження і вивантаження продукту, а також для спостереження. У субліматора є полки, на які укладають листи з продуктом. Якщо теплоносієм є гаряча вода або пара, то полки виготовляють порожнистими і пропускають теплоносій через порожнини всіх полиць. Якщо як теплоносій застосовують електричний струм, то полки виготовляють суцільними, а під стінками субліматора встановлюють нагрівачі (наприклад, лампи розжарювання або електроспіралі).

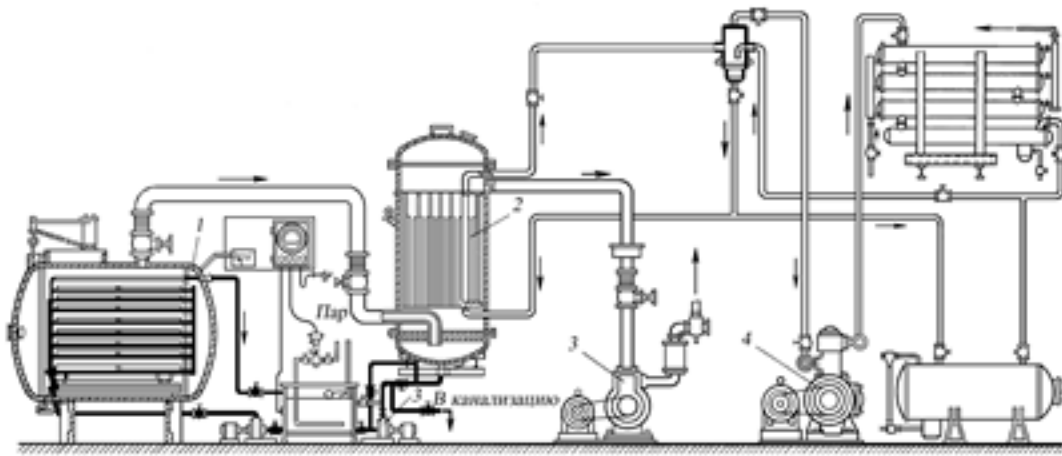


Рисунок 6.1 – Принципова схема сублімаційної сушарки: 1 – сушильна камера; 2 – конденсатор; 3 – вакуум-насос; 4 – холодильний компресор

Більш рівномірне нагрівання продукту досягається при обігріві плит парою під вакуумом або при застосуванні радіаційного підігріву або струмів високої частоти.

Субліматор з'єднаний з трубчастим або скребковим конденсатором, в якому відбуваються конденсація і льодоутворення пари вологи. Як охолоджуючий

агент в конденсаторі застосовують розсіл, попередньо охолоджений до $-20 \dots -25^{\circ}\text{C}$, або аміак, що має таку саму температуру.

Для нормального протікання процесу температура стінок конденсатора повинна бути нижче температури продукту на $20\dots 30^{\circ}\text{C}$ при досить розвиненій поверхні охолодження. Лід з пари продукту, що утворюється на поверхні охолодження конденсатора, видаляється шкребками або шляхом відтавання (в останньому випадку потрібно не менше двох конденсаторів).

Форвакуумні насоси призначені для видалення повітря з усієї системи і створення необхідного вакууму на початку процесу. При сталому процесі вони видаляють повітря (гази), що виділяється з продукту, абсорбованого на поверхні, а також повітря, що проникає у систему ззовні.

З метою скорочення тривалості створення первинного вакууму і економії енергії як правило встановлюють два форвакуумних насоса: один великої потужності, що створює початковий вакуум у системі, і другий меншої потужності для відкачування повітря під час роботи субліматора.

Продуктивність форвакуумних насосів повинна забезпечувати створення у системі залишкового тиску близько $66,7 \text{ Па}$. З цією метою застосовують ротаційні масляні форвакуумні насоси.

За допомогою холодильних компресорів отримують низькі температури у конденсаторах. Продуктивність компресорів залежить від кількості теплоти, що відбирається від конденсованої вологи у конденсаторах.

Для створення і підтримки вакууму у субліматорі можуть бути застосовані багатоступеневі (двох-, трьох- і чотириступеневі) парові ежекторні вакуумні насоси.

З метою економії витрати пари у сублімаційній установці перед основним конденсатором паралельно йому встановлюють два або три багатоступеневих ежектора, що працюють одночасно лише на початку сушіння, коли необхідно видаляти велику кількість пари. Потім допоміжні ежектори вимикають, залишаючи працювати тільки один головний. Неконденсовані гази видаляють з конденсатора триступеневим пароструменевим ежектором.

При сушінні продукт на деках поміщається в сушильну камеру, в якій потім створюється вакуум (залишковий тиск $133,3...266,6 \text{ Па}$). При такому вакуумі волога з продукту випаровується при $-10 \dots -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

У порожнисті плити сублиматор безперервно підводиться гаряча вода температурою близько $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Інтенсивність випаровування збільшується у двох випадках: при збільшенні кількості теплоти, що підводиться до продукту; при підвищенні швидкості видалення пари, що утворилася. Остання залежить від різниці між тисками пари біля поверхні матеріалу і у об'ємі конденсатора. Причому тиск у конденсаторі має бути вдвічі менший, ніж у сублиматорі.

Після закінчення сушіння систему вимикають, і продукт вивантажують з сублиматора.

При проектуванні необхідно намагатися скорочувати довжину трубопроводів і розташовувати сублиматор якомога ближче до конденсатора-десублиматора. Щоб скоротити шлях пари, конденсаційні плити іноді поміщають всередині сублимації камери. Для безперервної роботи сублимації установки застосовують вхідний і вихідний затвори в сублимації камері.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

Як вихідні дані для розрахунку задають:

- початковий вологовміст матеріалу $\bar{W}_0, \%$;
- вологовміст матеріалу у кінці періоду сублимації $\bar{W}_1, \%$;
- вологовміст матеріалу у кінці періоду досушування $\bar{W}_2, \%$;
- густина сухої речовини матеріалу $\rho_{\text{сyx}}, \text{ кг / м}^3$;
- тиск повітря у сублимаційній зоні сушарки $p_{\text{сyб}}, \text{ мм рт. ст.}$;
- кінцева температура матеріалу $t_{\text{к}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура поверхні матеріалу у процесі сублимації $t_{\text{с}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура стінки між матеріалом і холодоносієм $t_{\text{cm}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- норма завантаження матеріалу $m, \text{ кг / м}^2$;

- добова продуктивність сублімаційної сушарки за сирим продуктом $M, \text{кг} / \text{добу}$;
- коефіцієнт масовіддачі від матеріалу до повітря $\beta, \text{кг} / (\text{мм рт.ст.} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год})$;
- коефіцієнт швидкості досушування $k_1, \text{м} / (\text{мм рт.ст.} \cdot \text{град.} \cdot \text{год})$;
- температура середовища у субліматорі $T_{\text{суб}}, \text{K}$;
- температура кипіння холодильного агенту у десубліматорі T_0, K .

1. Знаходять товщину висушуваного шару матеріалу, m

$$h = \frac{m}{\rho_0},$$

де $\rho_0 = (1 + \bar{W}_0 / 100) \cdot \rho_{\text{сух}} = \text{кг} / \text{м}^3$ – густина вологого матеріалу.

2. З таблиці властивостей насиченої водяної пари t_s знаходять тиск насичення:

- при температурі $t_s, ^\circ \text{C}$ $p_m = \text{Па} = \text{мм рт.ст.}$;
- при температурі $t_{\text{см}}, ^\circ \text{C}$ $p_k = \text{Па} = \text{мм рт.ст.}$

3) Питома швидкість процесу сублімації, $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$

$$S = \beta \cdot (p_m - p_k).$$

4. Тривалість стадії сублімації, год

$$\tau_c = \frac{(\bar{W}_0 - \bar{W}_1) \cdot h \cdot \rho_{\text{сух}}}{100 \cdot S}.$$

5. Тривалість стадії досушування, год

$$\tau_d = \frac{\ln \left(\frac{\bar{W}_1}{\bar{W}_2} \right) \cdot h^{0,75}}{k_1 \cdot t_k^{0,5} \cdot p_{\text{суб}}^{0,2}}.$$

6. Загальна тривалість сублімаційного сушіння, год

$$\tau = \tau_c + \tau_d = \text{год}.$$

7. З урахуванням додаткових операцій завантаження і вивантаження задаються тривалістю циклу $\tau_{\text{ц}}, \text{год}$.

8. Кількість циклів за добу

$$n = \frac{24}{\tau_{\text{ц}}}.$$

9. Маса сирого матеріалу, що підлягає висушуванню за один цикл, кг

$$M_{\text{ц}} = \frac{M}{n}.$$

10. Необхідна поверхня завантаження для сублімації, м^2

$$F_3 = \frac{M_{\text{ц}}}{m}.$$

11. Кількість тепла, яке витрачається на сублімацію матеріалу, $\text{ккал} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$, $\text{кВт} / \text{м}^2$

$$Q_c = S \cdot r_c,$$

де r_c , $\text{Дж} / \text{кг}$, $\text{ккал} / \text{кг}$ – питома теплота сублімації водяного льоду.

12. Кількість тепла, яке витрачається на досушування матеріалу

$$Q_{\text{д}} = \frac{\rho_{\text{сyx}} \cdot h}{100 \cdot \tau_{\text{д}}} \cdot \left[(\bar{W}_1 - \bar{W}_2) \cdot r_c + (100 + \bar{W}_1) \cdot (t_k - t_s) \cdot c_m \right],$$

де $c_m = (1 - \bar{W}_1 / 100) \cdot c_{\text{с.р}} + \bar{W}_1 / 100 \cdot c_w \approx 0,5 \text{ ккал} / (\text{кг} \cdot \text{град.})$ – питома теплоємність досушуваного матеріалу за умовами початку періоду досушування (числовим значенням параметру задаються)

$$Q_{\text{д}}, \text{ккал} / (\text{м}^2 \cdot \text{год}), \text{кВт} / \text{м}^2.$$

13. У зв'язку з тим, що $Q_c \gg Q_{\text{д}}$, тому задаємося, що тепловий потік, який підводиться від нагрівачів, $\text{ккал} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$, $\text{кВт} / \text{м}^2$

$$Q_{\text{наг}} = 1,2 \cdot Q_c,$$

де 1,2 – коефіцієнт, який враховує нерівномірність процесу сублімації.

14. Повна потужність нагрівачів, кВт

$$\dot{Q}_{\text{наг}} = (Q_{\text{наг}})_F = Q_{\text{наг}} \cdot F_3.$$

15. Необхідна витрата теплоносія, що циркулює у нагрівачеві, якщо його охолодження складає $\Delta t_{\text{м/н}} = 5^\circ \text{C}$ (задаються), $\text{кг} / \text{с}$

$$G_{m/n} = \frac{\dot{Q}_{наг}}{c_w \cdot \Delta t_{m/n}},$$

де c_w – питома масова теплоємність теплоносія (як правило теплоносієм є вода), задаються $c_w = 4,196 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

16. Кількість вологи, яка видаляється з матеріалу за 1 годину:

– у період сублімації, $\text{кг} / \text{год}$

$$M_c = S \cdot F_3;$$

– у період досушування, $\text{кг} / \text{год}$

$$M_d = \frac{\bar{W}_1 - \bar{W}_2}{100 \cdot \tau_d} \cdot h \cdot \rho_{сух} \cdot F_3.$$

17. Найбільше навантаження на кріоконденсатор (десубліматор) створюється у період сублімації. З урахуванням коефіцієнта нерівномірності сушіння, що дорівнює 1,15, отримаємо, $\text{кг} / \text{год}$, $\text{кг} / \text{с}$

$$M_{dc} = 1,15 \cdot M_c.$$

18. Тепловий потік, що відводиться у кріоконденсаторі (десубліматорі), кВт

$$\dot{Q}_{dc} = M_{dc} \cdot r_c$$

19. Необхідна площа поверхні теплообміну кріоконденсатора (десубліматора), м^2

$$F_{dc} = \frac{\dot{Q}_{dc}}{k_{dc} \cdot \Delta t_{dc}} = \frac{\dot{Q}_{dc}}{k_{dc} \cdot (T_{суб} - T_0)},$$

де k_{dc} – коефіцієнт теплопередачі у десубліматорі;

$k_{dc} \approx \alpha = 5,3 + 3,6 \cdot w \approx 6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (задаються).

ЗАВДАННЯ

Виконати розрахунок енергетичних параметрів сублімаційної сушарки відповідно до вихідних даних.

За результатами розрахунку сублімаційної установки у завданні треба визначити:

- тривалість періоду сублімації;
- тривалість періоду досушування;
- теплові навантаження у період сублімації і досушування;
- характеристики десубліматора.

Вихідні дані для розрахунку беруть з табл. 6.1 відповідно до варіанту, визначеного викладачем.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані до завдання

Остання цифра шифру	$\bar{W}_0$, %	$\bar{W}_1$, %	$\bar{W}_2$, %	Передостання цифра шифру	$\rho_{сх}$, кг / м ³	$P_{суб}$, мм рт. ст.	t_k , °C	t_s , °C	t_{cm} , °C
1	190	12	1,2	1	155	0,18	55	-10	-50
2	195	13	1,3	2	160	0,2	54	-11	-45
3	200	14	1,5	3	165	0,22	53	-14	-40
4	205	15	1,4	4	170	0,24	49	-12	-30
5	210	16	1,6	5	175	0,26	52	-15	-25
6	215	17	1,7	6	180	0,28	51	-16	-30
7	220	18	1,8	7	185	0,3	48	-17	-35
8	225	19	1,48	8	190	0,25	47	-18	-45
9	230	20	1,9	9	172	0,2	50	-14	-40
0	235	21	2,0	0	150	0,16	56	-19	-50

ПРИКЛАД

Виконати розрахунок енергетичних параметрів сублімаційної сушарки відповідно до вихідних даних.

За результатами розрахунку сублімаційної установки у завданні треба **визначити**:

- тривалість періоду сублімації;
- тривалість періоду досушування;

- теплові навантаження у період сублімації і досушування;
- характеристики десубліматора.

Вихідні дані:

- початковий вологовміст матеріалу $\bar{W}_0 = 225 \%$;
- вологовміст матеріалу у кінці періоду сублімації $\bar{W}_1 = 19 \%$;
- вологовміст матеріалу у кінці періоду досушування $\bar{W}_2 = 1,48 \%$;
- густина сухої речовини матеріалу $\rho_{\text{сух}} = 170 \text{ кг} / \text{м}^3$;
- тиск повітря у сублімаційній зоні сушарки $p_{\text{суб}} = 0,24 \text{ мм рт. ст.}$;
- кінцева температура матеріалу $t_k = 49 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура поверхні матеріалу у процесі сублімації $t_s = -12 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура стінки між матеріалом і холодоносієм $t_{\text{ст}} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$.
- норма завантаження матеріалу $m = 5,6 \text{ кг} / \text{м}^2$;
- добова продуктивність сублімаційної сушарки за сирим продуктом $M = 1100 \text{ кг} / \text{добу}$;
- коефіцієнт масовіддачі від матеріалу до повітря $\beta = 0,68 \text{ кг} / (\text{мм рт. ст.} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год})$;
- коефіцієнт швидкості досушування $k_1 = 0,51 \cdot 10^{-2} \text{ м} / (\text{мм рт. ст.} \cdot \text{град.} \cdot \text{год})$;
- температура середовища у субліматорі $T_{\text{суб}} = 233 \text{ К}$;
- температура кипіння холодильного агенту у десубліматорі $T_0 = 193 \text{ К}$.

Розрахунок

1) Знаходимо товщину висушуваного шару матеріалу

$$h = \frac{m}{\rho_0} = \frac{5,6}{552,5} = 0,01 \text{ м},$$

де $\rho_0 = (1 + \bar{W}_0 / 100) \cdot \rho_{\text{сух}} = (1 + 225 / 100) \cdot 170 = 552,5 \text{ кг} / \text{м}^3$ – густина вологого матеріалу.

2) З таблиці властивостей насиченої водяної пари знаходимо:

- при температурі $t_s = -12 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_{\text{м}} = 217,6 \text{ Па} = 1,632 \text{ мм рт. ст.}$;

– при температурі $t_{cm} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $p_{\kappa} = 38,1\text{ Па} = 0,286\text{ мм рт. ст.}$

3) Питома швидкість процесу сублімації

$$S = \beta \cdot (p_m - p_{\kappa}) = 0,68 \cdot (1,632 - 0,286) = 0,915\text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{год}).$$

4) Тривалість стадії сублімації

$$\tau_c = \frac{(\bar{W}_0 - \bar{W}_1) \cdot h \cdot \rho_{\text{сух}}}{100 \cdot S} = \frac{(225 - 19) \cdot 0,01 \cdot 170}{100 \cdot 0,915} = 3,83\text{ год}.$$

5) Тривалість стадії досушування

$$\tau_d = \frac{\ln\left(\frac{\bar{W}_1}{\bar{W}_2}\right) \cdot h^{0,75}}{k_1 \cdot t_{\kappa}^{0,5} \cdot p_{\text{суб}}^{0,2}} = \frac{\ln\left(\frac{19}{1,48}\right) \cdot 0,01^{0,75}}{0,51 \cdot 10^{-2} \cdot 49^{0,5} \cdot 0,24^{0,2}} = 3\text{ год}.$$

6) Загальна тривалість сублімаційного сушіння

$$\tau = \tau_c + \tau_d = 3,83 + 3 = 6,83\text{ год}.$$

7) З урахуванням додаткових операцій завантаження і вивантаження задаємося тривалістю циклу $\tau_{\text{ц}} = 8\text{ год}.$

8) Кількість циклів за добу

$$n = \frac{24}{\tau_{\text{ц}}} = \frac{24}{8} = 3.$$

9) Маса сирого матеріалу, що підлягає висушуванню за один цикл

$$M_{\text{ц}} = \frac{M}{n} = \frac{1100}{3} = 367\text{ кг}.$$

10) Необхідна поверхня завантаження для сублімації

$$F_3 = \frac{M_{\text{ц}}}{m} = \frac{367}{5,6} = 65,5\text{ м}^2.$$

11) Кількість тепла, яке витрачається на сублімацію матеріалу

$$Q_c = S \cdot r_c = 0,915 \cdot 676,1 = 619\text{ ккал} / (\text{м}^2 \cdot \text{год}) = 0,721\text{ кВт} / \text{м}^2,$$

де $r_c = 283,3 \cdot 10^4\text{ Дж} / \text{кг} = 676,1\text{ ккал} / \text{кг}$ – питома теплота сублімації водяного льоду.

12) Кількість тепла, яке витрачається на досушування матеріалу

$$Q_{\partial} = \frac{\rho_{\text{сух}} \cdot h}{100 \cdot \tau_{\partial}} \cdot \left[(\bar{W}_1 - \bar{W}_2) \cdot r_c + (100 + \bar{W}_1) \cdot (t_k - t_s) \cdot c_m \right],$$

де $c_m = (1 - \bar{W}_1 / 100) \cdot c_{c.p} + \bar{W}_1 / 100 \cdot c_w \approx 0,5 \text{ ккал} / (\text{кг} \cdot \text{град.})$ — питома теплоємність досушуваного матеріалу за умовами початку періоду досушування (чисельним значенням параметру задаємося)

$$Q_{\partial} = \frac{170 \cdot 0,01}{100 \cdot 3} \cdot \left[(19 - 1,48) \cdot 676,1 + (100 + 19) \cdot (49 - (-12)) \cdot 0,5 \right] = 87,7 \text{ ккал} / (\text{м}^2 \cdot \text{год}) = 0,1 \text{ кВт} / \text{м}^2.$$

13) У зв'язку з тим, що $Q_c \gg Q_{\partial}$, тому задаємося, що тепловий потік, який підводиться від нагрівачів

$$Q_{\text{наг}} = 1,2 \cdot Q_c = 1,2 \cdot 619 = 743 \text{ ккал} / (\text{м}^2 \cdot \text{год}) = 0,866 \text{ кВт} / \text{м}^2,$$

де 1,2 — коефіцієнт, який враховує нерівномірність процесу сублімації.

14) Повна потужність нагрівачів

$$\dot{Q}_{\text{наг}} = (Q_{\text{наг}})_F = Q_{\text{наг}} \cdot F_3 = 0,866 \cdot 65,5 = 56,72 \text{ кВт}.$$

15) Необхідна витрата теплоносія, що циркулює у нагрівачеві, якщо його охолодження складає $\Delta t_{m/n} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (задаємося)

$$G_{m/n} = \frac{\dot{Q}_{\text{наг}}}{c_w \cdot \Delta t_{m/n}} = \frac{56,72}{4,196 \cdot 5} = 2,7 \text{ кг} / \text{с},$$

де c_w — питома масова теплоємність теплоносія (як правило теплоносієм є вода), задаємося $c_w = 4,196 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$.

16) Кількість вологи, яка видаляється з матеріалу за 1 годину:

— у період сублімації

$$M_c = S \cdot F_3 = 0,915 \cdot 65,5 = 60 \text{ кг} / \text{год};$$

— у період досушування

$$M_{\partial} = \frac{\bar{W}_1 - \bar{W}_2}{100 \cdot \tau_{\partial}} \cdot h \cdot \rho_{\text{сух}} \cdot F_3 = \frac{19 - 1,48}{100 \cdot 3} \cdot 0,01 \cdot 170 \cdot 65,5 = 6,5 \text{ кг} / \text{год}.$$

17) Найбільше навантаження на кріоконденсатор (десубліматор) створюється у період сублімації. З урахуванням коефіцієнта нерівномірності сушіння, що дорівнює 1,15, отримаємо

$$M_{\partial c} = 1,15 \cdot M_c = 1,15 \cdot 60 = 69 \text{ кг} / \text{год} = 0,0192 \text{ кг} / \text{с}.$$

18) Тепловий потік, що відводиться у кріоконденсаторі (десубліматорі)

$$\dot{Q}_{\partial c} = M_{\partial c} \cdot r_c = 0,0192 \cdot 2833 = 54,4 \text{ кВт}$$

19) Необхідна площа поверхні теплообміну кріоконденсатора (десубліматора)

$$F_{\partial c} = \frac{\dot{Q}_{\partial c}}{k_{\partial c} \cdot \Delta t_{\partial c}} = \frac{\dot{Q}_{\partial c}}{k_{\partial c} \cdot (T_{\text{суб}} - T_0)} = \frac{54,4 \cdot 10^3}{6 \cdot (233 - 193)} = 227 \text{ м}^2,$$

де $k_{\partial c}$ – коефіцієнт теплопередачі у десубліматорі;
 $k_{\partial c} \approx \alpha = 5,3 + 3,6 \cdot w \approx 6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (задаємося).

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає фізична сутність сублімаційного сушіння харчових продуктів?
2. За яких умов лід у продукті переходить у пару, міняючи рідку фазу?
3. Які основні переваги сублімаційного сушіння порівняно з тепловим сушінням?
4. Яке призначення сушильної камери, конденсатора, вакуумного насоса та холодильного компресора в сублімаційній установці?
5. Чому в сублімаційній сушарці необхідно підтримувати знижений тиск?
6. Від чого залежить швидкість процесу сублімації вологи з матеріалу?
7. Яке призначення стадії досушування після завершення основної стадії сублімації?
8. Чому температура стінок конденсатора повинна бути нижчою за температуру продукту?
9. Як визначають теплове навантаження на нагрівачі сублімаційної сушарки?
10. Які основні параметри необхідно визначити під час розрахунку десубліматора?

Практична робота № 7
ВИБІР ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО
ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВОЇ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Мета роботи: набуття здобувачами освіти практичних навичок розрахунку процесу теплового сушіння матеріалів, визначення питомих і повних навантажень, вибору основного електромеханічного обладнання сушильної установки.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

У роботі розглянуто найпростішу прямоточну конвективну сушарку. Її базовими елементами є повітрозабір, вентилятор, електрокалорифер, сушильна камера з матеріалом і канал відведення вологого повітря. Сушарка працює так: вентилятор подає свіже повітря, нагрівач підвищує його температуру, після чого повітря проходить через сушильну камеру і виносить із матеріалу випарену вологу.

Для сушіння деревини така схема є фізично зрозумілою і технологічно виправданою. Нагріте повітря продувається крізь штабель або камеру, забирає вологу з поверхні матеріалу, а потім частково або повністю відводиться назовні. У технічних сушарках для деревини вентилятори забезпечують циркуляцію повітря вздовж матеріалу, а теплообмінник або повітронагрівач підтримує потрібний температурний режим. Подібні гарячоповітряні сушарки використовують не лише для деревини, а й у сільському господарстві для сушіння зерна, насіння, плодів, овочів, лікарської сировини та інших матеріалів рослинного походження.

Термодинамічно процес у такій сушарці складається з двох послідовних етапів, що зображені на $H-d$ діаграмі (рис. 7.1 б). Перший етап 1–2 – це процес нагрівання повітря в електрокалорифері при сталому вологовмісті $d_1 = d_2$. Другий етап 2–3 – власне сушіння матеріалу, яке в межах спрощеної інженерної схеми беруть таким, що відбувається при сталій ентальпії, тобто $H_2 = H_3$.

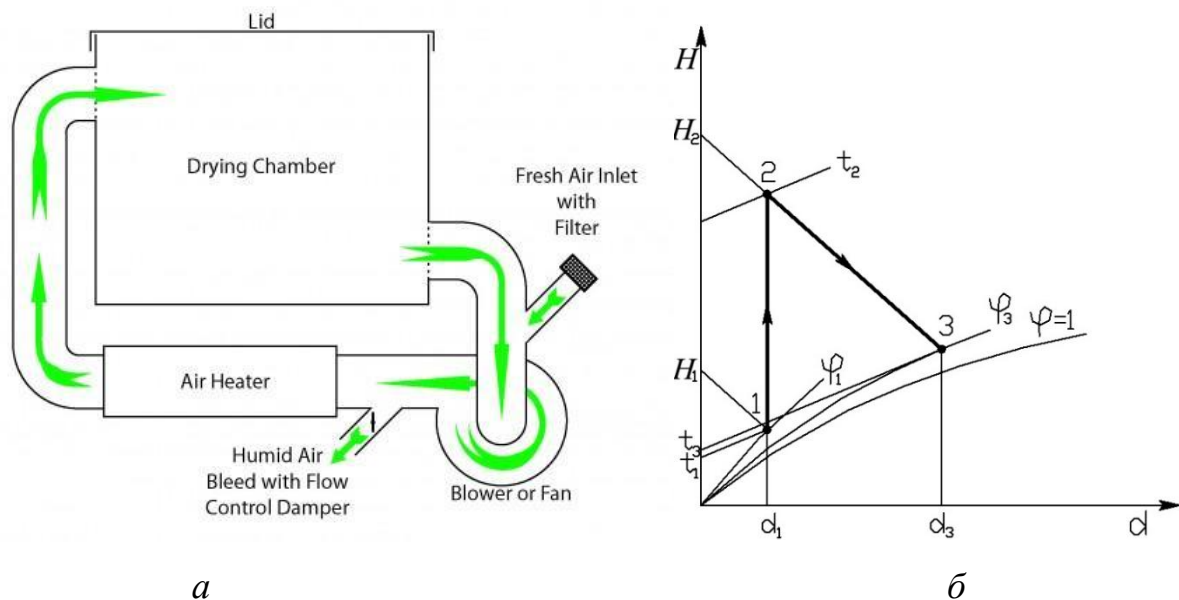


Рисунок 7.1 – Принципова конструкція (а)
і процесу теплового сушіння у $H - d$ діаграмі

Перевагами конвективного теплового сушіння є конструктивна простота, відносно невисока вартість обладнання, добра масштабованість, можливість регулювання температури і витрати повітря та придатність для широкого кола матеріалів. Гарячоповітряне сушіння вважається економічно доступною і просто реалізованою технологією, тому воно лишається одним із найпоширеніших промислових способів сушіння. Недоліками є порівняно значні витрати енергії, імовірність нерівномірного прогрівання, а для термочутливих матеріалів – ризик погіршення якості при надмірній температурі. Порівняно з тепловими насосами традиційне гарячоповітряне сушіння як правило простіше за конструкцією, але менш енергоефективне. Порівняно з інфрачервоним або комбінованим ІЧ-гарячоповітряним сушінням воно часто поступається за швидкістю процесу та питомими енерговитратами.

Під час вибору вентилятора для сушарки треба виходити з необхідної об'ємної продуктивності та повного напору мережі. Для сушильних установок із підвищеним аеродинамічним опором перевагу доцільно надавати відцентровим вентиляторам, а для енергоощадного режиму – виконанням із загнутими назад лопатками, оскільки для них характерна висока аеродинамічна ефективність. Привід вентилятора доцільно виконувати на базі короткозамкненого трифазного

асинхронного двигуна серії АІР або ІЕС-аналога. Для сталого режиму достатній прямий привід або жорстка муфта, а для регулювання продуктивності доцільне частотне керування.

Електрокалорифер потрібно добирати за тепловою потужністю, витратою повітря, допустимою швидкістю його проходження та умовами безпечної експлуатації. Для повітряних сушарок найбільш раціональними є каналні електрокалорифери з трубчастими або оребреними трубчастими нагрівальними елементами. Каталоги таких нагрівачів вказують на необхідність дотримання мінімальної швидкості повітря, застосування ступінчастого або пропорційного регулювання, а також двоступеневого захисту від перегрівання. Нагрівальні елементи доцільно брати з неіржавіючої сталі, а для підвищення інтенсивності теплообміну – оребреними.

ЗАВДАННЯ

Для сушіння деревини використовується повітря з параметрами t_1 і φ_1 . У електрокалорифері його температура підвищується до t_2 . Після чого повітря надходить до сушильної камери, де з поверхні деревини до повітря випаровується M вологи. У результаті цього температура повітря зменшується до t_3 . Визначити витрату повітря і тепла на 1 кг випареної вологи, потужність електронагрівачів та підібрати електрокалорифер, вентилятор і електропривід до нього. Задатися, що необхідний напір вентилятора складає Δp .

Завдання розв'язати за допомогою $H-d$ діаграми вологого повітря та навести схему процесу.

Вихідні дані взяти відповідно до варіанту з табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	$t_1, ^\circ C$	$\varphi_1, \%$	$t_2, ^\circ C$	$M, \text{кг} / \text{год}$	$t_3, ^\circ C$
1	5	60	40	10	22
2	8	55	42	12	24

Продовження табл. 7.1

Варіант	$t_1, ^\circ C$	$\phi_1, \%$	$t_2, ^\circ C$	$M, \text{кг} / \text{год}$	$t_3, ^\circ C$
3	10	50	44	14	26
4	12	45	46	16	28
5	14	40	48	18	29
6	16	35	50	20	30
7	18	30	52	22	31
8	20	25	54	24	32
9	10	30	45	26	27
10	12	25	48	28	29
11	15	10	50	30	30
12	17	15	52	32	32
13	15	20	55	34	33
14	13	30	56	36	34
15	11	35	58	38	35
16	9	40	60	40	36
17	7	45	62	42	38
18	6	50	64	45	39
19	8	20	58	48	37
20	10	15	60	50	39
21	12	10	62	55	41
22	14	15	65	60	43

ПРИКЛАД

Для сушіння деревини використовується повітря з параметрами $t_1 = 15^\circ C$ і $\phi_1 = 10\%$. У електрокалорифері його температура підвищується до $t_2 = 50^\circ C$. Після чого повітря надходить до сушильної камери, де з поверхні деревини до повітря випаровується $M = 30 \text{ кг} / \text{год}$ вологи. У результаті цього температура повітря зменшується до $t_3 = 30^\circ C$. Визначити витрату повітря і тепла на 1 кг випареної вологи, потужність електронагрівачів та підібрати електрокалорифер,

вентилятор і електропривід до нього. Задатися, що необхідний напір вентилятора складає $\Delta p = 2000 \text{ Па}$.

Завдання розв'язати за допомогою H, d – діаграми вологого повітря та навести схему процесу.

Розрахунок

Завдання розв'язуємо за допомогою H, d – діаграми вологого повітря та наводимо схему процесу (рис. 7.1).

Процес теплового сушіння складається з двох простих процесів:

1 – 2 – нагрівання повітря у електрокалорифері при постійному вологовмісті $d_1 = d_2$;

2 – 3 – процес висушування матеріалу при постійній ентальпії $H_2 = H_3$.

Визначимо параметри вологого повітря у характерних точках:

точка 1: $H_1 = 38 \text{ кДж / кг}$; $d_1 = d_2 = 0,001 \text{ кг / кг}$;

точка 2: $H_2 = 73 \text{ кДж / кг}$;

точка 3: $I_3 = I_2 = 73 \text{ кДж / кг}$; $d_3 = 0,009 \text{ кг / кг}$; $\varphi_3 = 34\%$.

Питома кількість тепла, що підводиться у електрокалорифері до 1 кг сухого повітря

$$q = H_2 - H_1 = 73 - 38 = 35 \text{ кДж / кг сух. пов.}$$

Питома кількість вологи, що відводиться від деревини у процесі сушіння

$$w = d_3 - d_2 = 0,009 - 0,001 = 0,008 \text{ кг вологи / кг сух. пов.}$$

Питома кількість тепла, що підводиться у електрокалорифері сушарки до 1 кг випареної вологи

$$q_w = \frac{H_2 - H_1}{d_3 - d_2} = \frac{q}{w} = \frac{35}{0,008} = 4375 \text{ кДж / кг вологи}.$$

Питома витрата повітря, що проходить через сушарку на 1 кг випареної вологи

$$W = \frac{1}{d_3 - d_2} = \frac{1}{w} = \frac{1}{0,008} = 125 \text{ кг сух. пов. / кг вологи}.$$

Електрична потужність електрокалорифера на нагрівання повітря

$$P = \frac{M}{3600} \cdot q_w = \frac{30}{3600} \cdot 4375 = 36,5 \text{ кВт}.$$

Витрата повітря через сушарку

$$G = \frac{M}{3600} \cdot W = \frac{30}{3600} \cdot 125 = 1,042 \text{ кг сух. пов. / с}.$$

Густина повітря за нормальними технічними умовами

$$\rho_{н.т.у} = \frac{p_{н.т.у}}{R \cdot T_{н.т.у}} = \frac{101325}{286,7 \cdot 293} = 1,206 \text{ кг / м}^3,$$

де $p_{н.т.у} = 101325 \text{ Па}$ і $T_{н.т.у} = 293 \text{ К}$ – тиск і абсолютна температура, що відповідає нормальним технічним умовам (н.т.у.);

R – газова стала; для повітря $R = 8314 / 29 = 286,7 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)}$;

Необхідна об'ємна продуктивність вентилятора, зведена до нормальних технічних умов

$$\dot{V}_{\text{вент}} = \frac{G}{\rho_{н.т.у}} = \frac{1,042}{1,206} = 0,864 \text{ м}^3 / \text{с} = 3110 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

Кінцевий тиск, створюваний вентилятором

$$p_2 = p_1 + \Delta p = 101325 + 2000 = 103325 \text{ Па},$$

де p_1 – тиск повітря за умовами всмоктування, який дорівнює атмосферному тиску; задаємося $p_1 = p_{атм} = 101325 \text{ Па}$.

Ступінь підвищення тиску у вентиляторі

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{103325}{101325} = 1,02.$$

Електрична потужність вентилятора

$$\begin{aligned} P_{\text{вент}} &= G \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] / (\eta_{oi} \cdot \eta_{нep} \cdot \eta_{eo}) = \\ &= 1,042 \cdot \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 0,2867 \cdot 288 \cdot \left[1,02^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] / (0,75 \cdot 0,99 \cdot 0,9) = \\ &= 2,53 \text{ кВт}, \end{aligned}$$

де T_1 – абсолютна температура повітря у точці 1; $T_1 = t_1 + 273 = 15 + 273 = 288 \text{ К}$;

k – показник адіабати; для повітря $= 1,4$;

η_{oi} – відносний внутрішній ККД вентилятора;

$\eta_{пер}$ – ККД передачі муфти між вентилятором і електродвигуном; для жорстких муфт $\eta_{пер} = 0,99$

$\eta_{ед}$ – ККД електродвигуна електрокалорифера; попередньо задаємося $\eta_{ед} = 0,9$

За отриманим значенням об'ємної продуктивності $\dot{V}_{вент} = 3110 \text{ м}^3 / \text{год}$ і напором $\Delta p = 2 \text{ кПа}$ підбираємо відцентровий вентилятор марки високого тиску VC 6-28 (VR 120-28) № 5. Його робочі діапазони за продуктивністю та тиском при комплектуванні електродвигуном АІР90L2, 3 кВт, 3000 об/хв, аеродинамічна характеристика показує, що точка близько $3,1 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{год}$ і $2,0 \text{ кПа}$ потрапляє в придатну робочу зону вентилятора.

За отриманим значенням потужності вентилятора $P_{вент} = 2,53 \text{ кВт}$ для вибраного вентилятора доцільно прийняти трифазний асинхронний електродвигун АІР90L2. Його паспортні параметри: номінальна потужність $3,0 \text{ кВт}$, фактична частота обертання близько 2860 об/хв , напруга $230/400 \text{ В}$, номінальний струм $6,34 \text{ А}$, ККД $82,6 \%$, $\cos \varphi = 0,87$.

За отриманим значенням теплової потужності $P = 36,5 \text{ кВт}$ і витрати повітря через калорифер $\dot{V}_{вент} = 0,864 \text{ м}^3 / \text{с} = 3110 \text{ м}^3 / \text{год}$ підбираємо електрокалорифер серії EKS 600×350 на 39 кВт . У каталозі серії EKS для типорозміру $600 \times 350 \text{ мм}$ передбачені виконання до 39 кВт , а також зазначено мінімальну допустиму швидкість повітря $1,5 \text{ м/с}$. Для нашого прикладу при витраті $3110 \text{ м}^3 / \text{год}$ і площі перерізу $0,6 \times 0,35 = 0,21 \text{ м}^2$ швидкість становить приблизно $4,1 \text{ м/с}$, тобто умова надійної роботи калорифера виконується. За формулою каталогу $P = 0,36 \cdot \dot{V}_{вент} \cdot (t_2 - t_1)$ потужність 39 кВт практично відповідає потрібному нагріванню повітря від $15 \text{ }^\circ\text{C}$ до $50 \text{ }^\circ\text{C}$ при $\dot{V}_{вент} \approx 3110 \text{ м}^3 / \text{год}$.

Для такого калорифера доцільно застосовувати трубчасті або оребрені трубчасті нагрівальні елементи. У каталогах повітряних каналних нагрівачів саме трубчасті елементи з нержавіючої сталі розглядаються як стандартне

виконання, а оребрені трубчасті елементи рекомендуються для інтенсивнішої теплопередачі в потоці повітря та нижчої температури поверхні елемента.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає фізична суть процесу теплового сушіння?
2. Які основні елементи має найпростіша конвективна сушарка?
3. Чому процес у електрокалорифері на $H-d$ діаграмі зображають при сталому вологовмісті?
4. Чому процес сушіння в камері в першому наближенні приймають таким, що відбувається при сталій ентальпії?
5. Як визначають питому кількість теплоти, що підводиться до 1 кг сухого повітря?
6. Як визначають кількість вологи, що відводиться від матеріалу в процесі сушіння?
7. Що показує питома витрата повітря на 1 кг випареної вологи?
8. За якими параметрами підбирають вентилятор для сушильної установки?
9. Які чинники враховують під час вибору електрокалорифера?
10. Чому потужність електродвигуна вентилятора повинна мати запас відносно розрахункової потужності вентилятора?

Практична робота № 8

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПАРОКОМПРЕСІЙНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

Мета роботи: набути практичних навичок теплового розрахунку одноступеневої парокомпресійної холодильної машини; навчитися визначати параметри робочих точок холодильного циклу, питомі теплові навантаження на основні елементи установки, масову витрату холодильного агенту, споживану електричну потужність компресора та коефіцієнт термотрансформації холодильного циклу за заданих умов роботи, вибирати холодильний компресор з електроприводом.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Роботу виконують для одноступеневої парокомпресійної холодильної машини (ПКХМ). Результатами теплового розрахунку холодильної машини є показники споживаної електричної потужності холодильної машини та коефіцієнт термотрансформації – безрозмірний параметр, що дозволяє оцінити теплову ефективність холодильного циклу.

На рис. 8.1 зображена принципова схема та цикл у p, h – діаграмі одноступеневої (ПКХМ). Тут p – тиск холодильного агенту, а h – питома ентальпія.

Умовні позначення елементів на рис. 8.1: KM – компресор; $KД$ – конденсатор; PT – регенеративний теплообмінник; $ДВ$ – дросельний вентиль; B – випарник.

Термодинамічні процеси, що утворюють цикл одноступеневої ПКХМ:

1-2 – політропне (дійсне) стиснення пари холодильного агенту в компресорі KM від тиску кипіння p_0 до тиску конденсації p_k ;

1-2s – адіабатне (теоретичне) стиснення пари холодильного агенту в компресорі KM від тиску кипіння p_0 до тиску конденсації p_k ;

2-3 – ізобарне відведення теплоти в конденсаторі $KД$ при тиску p_k ;

3-4 – переохолодження холодильного агенту при тиску p_k у PT ;

4-5 – дроселювання холодильного агенту у $ДВ$ від тиску p_k до p_0 ;

5-6 – ізобарне підведення теплоти у випарнику B холодильної машини при тиску p_0 ;

6-1 – перегрівання пари холодильного агенту у PT .

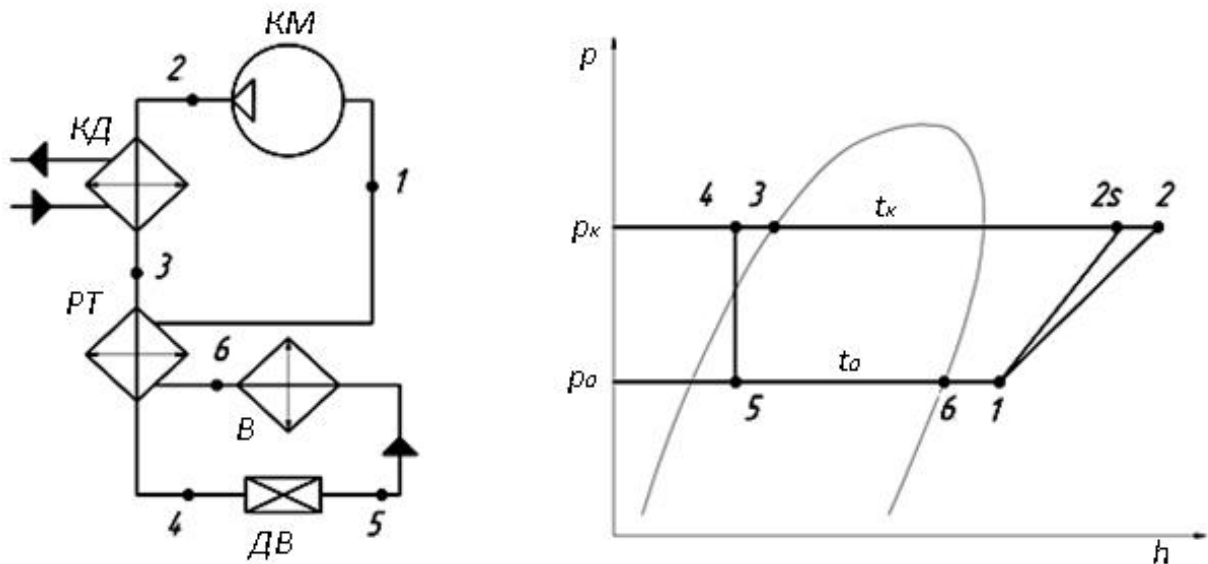


Рисунок 8.1 – Принципова схема та цикл у p, h – діаграмі одноступеневої ПКХМ

Тепловий розрахунок визначається принциповою схемою холодильного циклу, яка, у свою чергу, визначається типом робочого тіла, що реалізує цей цикл, яке називають холодильний агент, а також діапазоном температур, що визначають кипіння і конденсацію. Одноступенева ПКХМ є домінуючим видом середньотемпературних холодильних машин, де холодильним агентом є фреони (штучно синтезовані речовини, переважно хлорфторвуглеводні, або їх суміші) та природні речовини, наприклад, аміак, бутан, пентан та їх ізомери. Ключовим для вибору холодильного агенту є його енергетична ефективність у холодильному циклі, екологічна безпечність, стабільність у широкому діапазоні температур, порівняно невеликі тиски у межах робочих температур циклу, можливість реалізації фазових переходів (кипіння та конденсація) при таких температурах тощо. Умовне позначення холодильного агенту починається з букви «R» – скорочення від Refrigerant (англ. – холодильний агент), а далі йде умовний

цифрово-буквенний код, що вказує на хімічну формулу речовини, вид її ізомеру (за наявності), кількість та відсотковий склад таких речовин у суміші. При використанні штучно синтезованих речовин за основу беруть більш енергоефективний цикл одноступеневої ПКХМ з регенеративним теплообмінником, що розглядається у цій роботі. Як фреони для такої схеми і циклу зараз переважно використовуються R134a і R600a. Треба зазначити, що такий цикл є найбільш розповсюдженим як для промислових, так і для побутових холодильних машин.

Розглянемо методику теплового розрахунку одноступеневої ПКХМ.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

Такий розрахунок виконують або графічно за допомогою p, h – діаграми для відомого холодильного агенту, що є наочним і доступним способом, але не надто точним, або за допомогою спеціалізованих програм, наприклад, REFPROP.

На початку з діаграми визначають характерні точки циклу (див. рис. 8.1), kJ/kg :

$$h_3 = f(t_k; x_3 = 0); h_6 = f(t_0; x_6 = 1),$$

де x_3, x_6 – відповідно ступінь сухості у точках 3 і 6 (якщо $x = 0$ – вважається, що агрегатний стан робочого тіла – насичена рідина (початок процесу кипіння – ліва обмежувальна крива на p, h – діаграмі); якщо $x = 1$ – суха насичена пара, завершення процесу кипіння – права обмежувальна крива на p, h – діаграмі);

t_k і t_0 – відповідно температури конденсації і кипіння.

Стан у т. 1 знаходять на продовженні ізобари $p_0 = p_1$, де вона перетнеться з ізотермою, $^{\circ}C$

$$t_1 = t_0 + \Delta t_{nep},$$

де Δt_{nep} – перегрів холодильного агенту у РТ; як правило задають $\Delta t_{nep} = 5 - 20^{\circ}C$ залежно від перепаду тисків p_k / p_0 і типу холодильного агенту.

Розглянемо регенеративний теплообмінник РТ (рис. 8.1) та запишемо його тепловий баланс

$$h_3 - h_4 = h_1 - h_6$$

Тоді стан після PT (т. 4) знаходять з розгляду теплового балансу PT , $\kappaДж / кг$

$$h_4 = h_3 - (h_1 - h_6) .$$

Стан у т. 2s знаходять на перетині ізоентипи $s_{2s} = s_1$ із ізобарою $p_{2s} = p_k$.

Дійсні параметри у точці 2, $\kappaДж / кг$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{oi}},$$

де η_{oi} – відносний внутрішній ККД холодильного компресора.

Стан у т. 5 знаходять на перетині ізоентальпи $h_5 = h_4$ і ізобари $p_5 = p_0$.

Для зручності результати зводять до табл. 2.1.

Таблиця 8.1 – Параметри у вузлових точках ПКХМ

Параметри	1	2s	2	3	4	5	6
$t, ^\circ C$							
$p, МПа$							
$h, \frac{\kappaДж}{кг}$							
x	—	—	—	0	—		1,0

Розраховують питомі навантаження на основні елементи холодильного циклу і робота компресора, $\kappaДж / кг$:

– питома холодопродуктивність

$$q_0 = h_6 - h_5;$$

– питоме теплове навантаження на конденсатор

$$q_K = h_2 - h_3;$$

– питоме теплове навантаження на РТ

$$q_{PT} = h_3 - h_4 .$$

– питома робота компресора

$$l_K = h_2 - h_1 .$$

Розраховують необхідну масову витрату холодильного агенту у холодильному циклі, $кг / с$

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{Q}_0}{q_0},$$

де $\dot{Q}_0$ – повна холодопродуктивність циклу (задається або попередньо розраховується за виразом

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot \Delta t_w,$$

де $\dot{m}_w$ – масова витрата охолоджуваного середовища;

c_w – питома масова теплоємність охолоджуваного середовища;

Δt_w – перепад температур охолоджуючого середовища у процесі охолодження.

Теплове навантаження на конденсатор, $кВт$

$$\dot{Q}_{KD} = q_K \cdot \dot{m}_a.$$

Теплове навантаження на РТ, $кВт$

$$\dot{Q}_{PT} = q_{PT} \cdot \dot{m}_a.$$

Електрична потужність компресора, $кВт$

$$N_{el} = l_{KM} \cdot \dot{m}_a / \eta_{em},$$

де η_{em} – електромеханічний ККД привода компресора.

Коефіцієнт термотрансформації циклу ПКХМ електричний

$$COP_e = \frac{\dot{Q}_0}{N_{el}}.$$

Отримане значення COP_e показує, скільки тепла буде відведено на низькотемпературному рівні (при t_0) при споживанні з електричної мережі 1 кВт енергії. Для ПКХМ значення $COP_e > 1$ і чим більшим воно є, тим енергетично ефективнішою є холодильна машина.

ЗАВДАННЯ

Визначити споживану електричну потужність одноступеневої ПКХМ та коефіцієнт термотрансформації COP_e відповідно до вихідних даних, поданих в табл. 8.2.

Холодильна машина працює для охолодження рідини на $\Delta t_w, ^\circ C$ до температури $t_{w2}, ^\circ C$. Масова витрата рідини $\dot{m}_w, m / год$.

Температура повітря довкілля $t_{o,c} ^\circ C$, яке відводить тепло у конденсаторі. Холодильний агент заданий.

Таблиця 8.2 – Вихідні дані до практичної роботи 2

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta t_w, ^\circ C$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_{w2}, ^\circ C$	3	-10	7	-15	12	-20	18	-25	22	-30	20
$\dot{m}_w, m / год$	0,5	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
Рідина	вода	етиленгліколь	вода	етиленгліколь	вода	етиленгліколь	вода	етиленгліколь	вода	етиленгліколь	вода
$t_{o,c}, ^\circ C$	15	17	20	23	27	30	32	35	38	40	42
Холодильний агент	R134a	R600a	R134a	R600a	R134a	R600a	R134a	R600a	R134a	R600a	R134a
Варіант	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$\Delta t_w, ^\circ C$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$t_{w2}, ^\circ C$	-2	16	-7	14	-4	12	-12	10	-8	8	-18
$\dot{m}_w, m / год$	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75
Рідина	етиленгліколь	вода	етиленгліколь	вод	етиленгліколь	вода	етиленгліколь	вода	етиленгліколь	вода	етиленгліколь
$t_{o,c}, ^\circ C$	45	50	12	10	7	5	0	-5	20	0	30
Холодильний агент	R600a	R134a	R600a	R134a	R600a	R134a	R600a	R134a	R600a	R134a	R600a

ПРИКЛАД

Визначити споживану електричну потужність одноступеневої ПКХМ та коефіцієнт термотрансформації COP_e відповідно до вихідних даних, поданих в табл. 8.2.

Холодильна машина працює для охолодження етиленгліколю на $\Delta t_w, ^\circ\text{C}$ до температури $t_{w2} = -15, ^\circ\text{C}$. Масова витрата рідини $\dot{m}_w, \text{m} / \text{год}$.

Температура повітря довкілля $t_{н.с} = 20 ^\circ\text{C}$, яке відводить тепло у конденсаторі. Холодильний агент R600a.

Розрахунок

Температура кипіння холодильного агенту

$$t_0 = t_{w2} - \Delta t_B^{np} = -15 - 5 = -20^\circ \text{C},$$

де Δt_B^{np} – недорекуперація у випарнику; для рідин задають $\Delta t_B^{np} = 5^\circ \text{C}$.

Температура конденсації холодильного агенту

$$t_k = t_{н.с} + \Delta t_{KD}^{np} = 20 + 10 = 30^\circ \text{C},$$

де Δt_{KD}^{np} – недорекуперація у конденсаторі; для газів задають $\Delta t_{KD}^{np} = 10^\circ \text{C}$.

Розглянемо регенеративний теплообмінник PT .

Стан після PT (т. 4) знаходимо з розгляду виразу теплового балансу PT :

$$h_3 - h_4 = h_1 - h_6,$$

$$h_4 = h_3 - (h_1 - h_6),$$

$$h_4 = 271 - (551 - 528) = 248 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Дійсні параметри у точці 2:

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_s} = 551 + \frac{618 - 551}{0,8} = 635 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Питома холодопродуктивність

$$q_0 = h_6 - h_5 = 528 - 247 = 281 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Питоме теплове навантаження на конденсатор

$$q_K = h_2 - h_3 = 635 - 271 = 364 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Параметри у вузлових точках наведено у табл. 8.3.

Таблиця 8.3 – Параметри у вузлових точках ПКХМ

Параметри	1	2s	2	3	4	5	6
$t, ^\circ C$	-5	43	52	30	22	-20	-20
p, MPa	0,072	0,405	0,405	0,405	0,405	0,072	0,072
$h, \frac{kJ}{kg}$	551	618	635	271	247	247	528
x	—	—	—	0	—		1,0

Питоме теплове навантаження на РТ

$$q_{PT} = h_3 - h_4 = 271 - 248 = 23 \frac{kJ}{kg}.$$

Холодопродуктивність

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot \Delta t_w = \frac{15,7}{3,6} \cdot 2,294 \cdot 10 = 100 kVt,$$

де c_w – питома теплоємність рідини; для води $c_w = 4,19 kJ / (kg \cdot K)$; для етиленгліколю $c_w = 2,294 kJ / (kg \cdot K)$.

Масова витрата холодильного агента

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{Q}_0}{q_0} = \frac{100}{281} = 0,356 \frac{kg}{s}.$$

Теплове навантаження на конденсатор

$$\dot{Q}_{KD} = q_K \cdot \dot{m}_a = 364 \cdot 0,356 = 129,9 kVt.$$

Теплове навантаження на РТ

$$\dot{Q}_{PT} = q_{PT} \cdot \dot{m}_a = 23 \cdot 0,356 = 8,2 kVt.$$

Електрична потужність компресора

$$N_{el} = l_{KM} \cdot \dot{m}_a / \eta_{em} = 84 \cdot 0,356 / 0,9 = 29,9 kVt.$$

Коефіцієнт термотрансформації циклу ПКХМ електричний

$$COP_{el} = \frac{\dot{Q}_0}{N_{el}} = \frac{100}{29,9} = 3,34.$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає принцип дії одноступеневої парокомпресійної холодильної машини?
2. Які основні елементи входять до складу парокомпресійної холодильної машини та яке їх призначення?
3. Які термодинамічні процеси формують цикл одноступеневої ПКХМ?
4. Яке призначення регенеративного теплообмінника у холодильному циклі?
5. Чим відрізняється дійсне стиснення пари в компресорі від теоретичного адіабатного стиснення?
6. Що називають питомою холодопродуктивністю холодильного циклу?
7. Як визначають масову витрату холодильного агенту в циклі?
8. Від яких параметрів залежить електрична потужність компресора?
9. Що показує коефіцієнт термотрансформації холодильного циклу і як оцінюють його значення?
10. Які фактори впливають на енергетичну ефективність парокомпресійної холодильної машини?

Практична робота № 9

РОЗРАХУНОК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

Мета роботи: набути практичних навичок розрахунку основних енергетичних і конструктивних параметрів термоелектричної холодильної машини; навчитися визначати холодопродуктивність термоелемента, тепловий потік, що відводиться гарячим спаєм, споживану електричну потужність та коефіцієнт перетворення холодильного циклу COP з урахуванням геометричних параметрів електродів, електричних і теплових характеристик матеріалу, а також температурних умов роботи установки.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Схема і цикл термоелектричної холодильної машини. Процеси, що відбуваються у термоелектричній холодильній машині (рис. 9.1) (робоча речовина – «електронний» газ):

- 1–2 – політропний (поглинання теплоти Томпсона);
- 2–3 – ізотермічний (виділення теплоти Пельтьє);
- 3–4 – політропний (виділення теплоти Томпсона);
- 4–1 – ізотермічний (поглинання теплоти Пельтьє).

Спрощення: Джоулеве тепло і теплопровідність матеріалу відсутні.

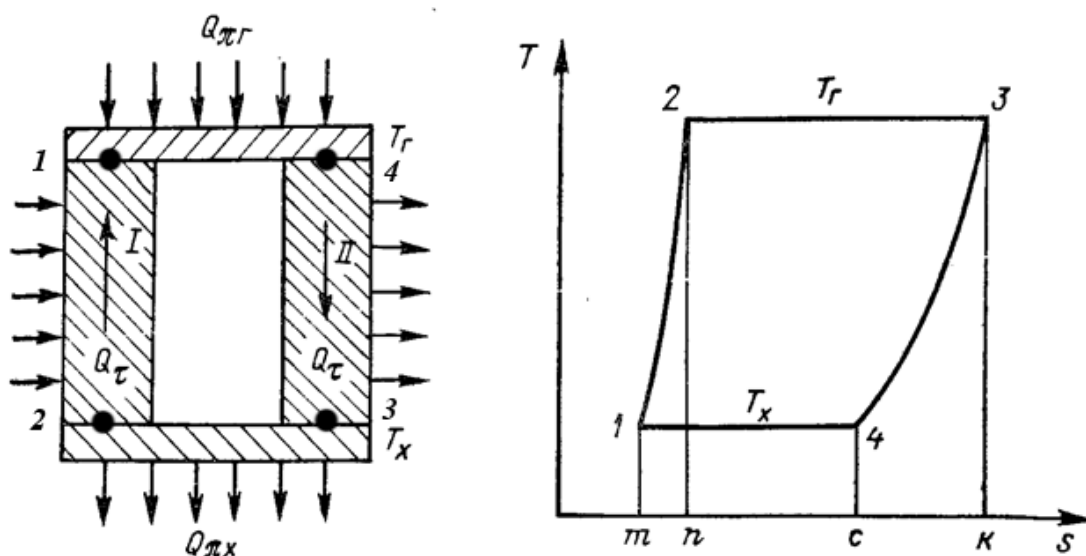


Рисунок 9.1 – Схема і цикл короткозамкнутого ланцюга термоелектричної холодильної машини

Ефект Томсона – явище нагрівання або охолодження провідника зі струмом в умовах існування градієнта температури (причини теплообміну).

Пояснення ефекту у першому наближенні таке. В умовах, коли вздовж провідника, по якому протікає струм, існує градієнт температури, причому напрям струму відповідає руху електронів від гарячого кінця до холодного, при переході з більш гарячого перерізу у холодніший електрони передають надлишкову енергію навколишнім атомам (виділяється теплота), а при зворотному напрямі струму, проходячи від холоднішої ділянки до гарячої, поповнюють свою енергію рахунок навколишніх атомів (теплота поглинається).

Ефект відкритий Вільямом Томсоном у 1851 році.

Ефект Пельтьє – явище виділення або поглинання тепла на контактах двох провідників при проходженні через них електричного струму.

Явище нагрівання або охолодження контакту між провідниками, коли через нього проходить електричний струм, відкрив французький фізик Жан Пельтьє у 1834 р.

Якщо контакт нагрівається, то ефект Пельтьє називають позитивним, якщо охолоджується – негативним.

Причина виникнення явища Пельтьє така. На контакті двох речовин наявна контактна різниця потенціалів, що створює внутрішнє контактне поле. Якщо через контакт протікає електричний струм, це поле сприятиме проходженню струму, або перешкоджати. Якщо струм йде проти контактного поля, то зовнішнє джерело має витратити додаткову енергію, яка виділяється в контакті, що призведе до його нагрівання. Якщо струм йде у напрямку контактного поля, то він може підтримуватися цим полем, яке і здійснює роботу з переміщення зарядів. Необхідна для цього енергія відбирається у речовини, що призводить до охолодження їх у місці контакту.

Ефект Пельтьє помітніший у напівпровідників, ця властивість використовується в елементах Пельтьє.

p-n-перехід. У напівпровіднику *p-типу*, який утворюється за допомогою введення акцепторної домішки, концентрація дірок набагато перевищує

концентрацію електронів. У напівпровіднику ***n-типу***, який утворюється за допомогою донорної домішки, концентрація електронів набагато перевищує концентрацію дірок.

Якщо між двома такими напівпровідниками встановити контакт, то виникне ***дифузійний струм*** – основні носії заряду (електрони та дірки) хаотично перетікатимуть із тієї області, де їх більше, ту область, де їх менше, і рекомбінуватимуть один з одним. Як наслідок поблизу межі між областями практично не буде вільних (рухомих) основних носіїв заряду, але залишаться іони домішок з некомпенсованими зарядами.

Область у напівпровіднику р-типу, яка має контакт до межі, отримує при цьому негативний заряд, що приноситься електронами, а прикордонна область у напівпровіднику n-типу отримує позитивний заряд, що приноситься дірками (точніше, втрачає негативний заряд, що носить електронами).

Отже, на межі напівпровідників утворюються два шари з просторовими зарядами протилежного знаку, що породжують у переході електричне поле. Це поле викликає дрейфовий струм, що має протилежний напрямок дифузійному струму. Зрештою, між дифузійним та дрейфовим струмами встановлюється динамічна рівновага, і зміна просторових зарядів припиняється. Збіднені області з нерухомими просторовими зарядами називають ***p-n-переходом*** (рис. 9.2).

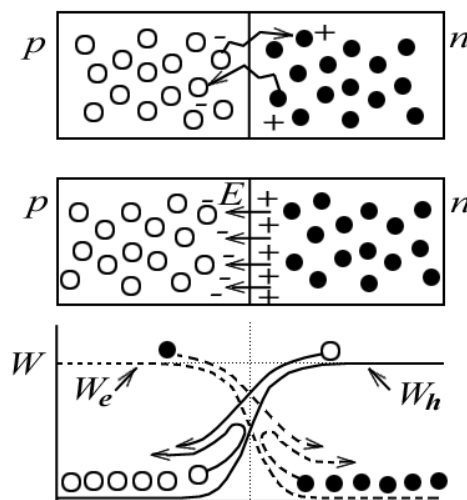


Рисунок 9.2 – *p-n-перехід*

При ввімкненні p - n -переходу у прямому напрямку (рис. 9.3 а) дірки в лівій області рухатимуться до межі розділу, і електрони з правої області також рухатимуться до межі розділу. На кордоні вони рекомбінуватимуть. Струм на всіх ділянках ланцюга забезпечується основними носіями, сам перехід збагачений носіями струму. Провідність p - n -переходу буде великою.

При ввімкненні p - n -переходу у зворотному напрямку (рис. 9.3 б) та дірки в лівій області рухатимуться від межі розділу, і електрони з правої області також рухатимуться від межі розділу. На межі розділу областей у результаті залишиться основних носіїв струму. Струм на цьому кордоні забезпечується дуже малою кількістю неосновних носіїв, що утворилися поблизу тонкого переходу. Провідність p - n -переходу буде малою.

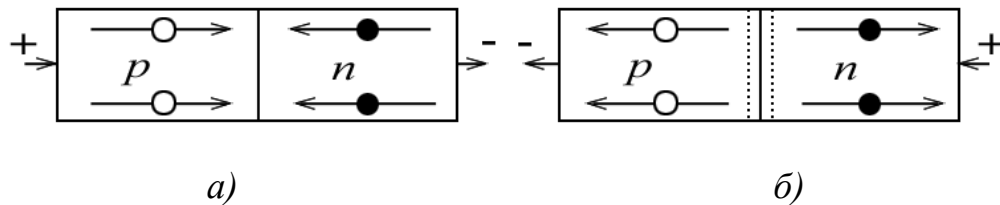


Рисунок 9.3 – Схеми руху електронів і дірок при прямому (а) та зворотному (б) ввімкненні p - n -переходу

ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ

Теплота Томпсона (виділяється за умови співпадіння напрямку струму ланцюга і градієнта температури; кількість теплоти Томсона пропорційна силі струму, тривалості та перепаду (градієнту) температур, залежить від напрямку струму)

$$Q_{\tau} = I \int_{T_x}^{T_r} \tau dT ,$$

де τ – коефіцієнт Томпсона.

Теплота Пельтьє (виникає під час проходження постійного струму через спай (термоелемент); вона поглинається при співпадінні напрямку струму і термоструму, що виникає при нагріванні (охолодженні) спаю):

$$Q_{\pi} = \pi \cdot I ,$$

де π – коефіцієнт Пельтьє,

$$\pi = \alpha \cdot T,$$

де α – диференціальний коефіцієнт термо-ЕРС, $\text{мкВ} / \text{K}$.

Теплота Джоуля:

$$Q_{\text{дж}} = I^2 \cdot R.$$

Теплота, що передається у місцях контакту (спаях) за рахунок теплопровідності:

$$Q_T = \lambda \cdot (T_{\Gamma} - T_X) / \delta \cdot F,$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності гілок термоелементу;

δ – висота термоелементу.

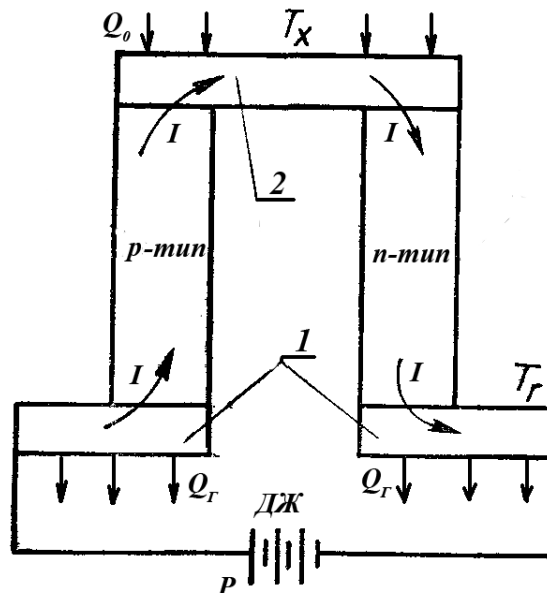


Рисунок 9.4 – Принципова схема термоелементу:

1 – гарячий спай; 2 – холодний спай

Холодопродуктивність термоелементу

$$Q_0 = Q_\pi - 0,5 \cdot Q_{\text{дж}} - Q_T = \alpha \cdot T_X \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot (T_{\Gamma} - T_X) / \delta \cdot F.$$

Тепловий потік, що відводиться гарячим спаєм (відводиться у довкілля):

$$Q_{\Gamma} = \alpha \cdot T_{\Gamma} \cdot I + 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot (T_{\Gamma} - T_X) / \delta \cdot F.$$

Потужність, що споживається термоелементом

$$P = I^2 \cdot R + \alpha \cdot (T_{\Gamma} - T_X) \cdot I.$$

Коефіцієнт термотрансформації холодильного циклу

$$COP = \varepsilon = \frac{Q_0}{P} = \frac{\alpha \cdot T_x \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot (T_r - T_x) / \delta \cdot F}{I^2 \cdot R + \alpha \cdot (T_r - T_x) \cdot I}.$$

Вимоги до матеріалів термоелементів:

- 1) високий коефіцієнт електропровідності;
- 2) низька теплопровідність (кристалічна і електронна);
- 3) стабільність і відтворюваність характеристик (теплопровідність, електропровідність) напівпровідника у широкому діапазоні температур;
- 4) висока міцність термопар.

Застосовують сплави на основі вісмуту Ві і селену Се типу **ТВЕХ-1** і **ТВВЕХ-2**, що використовують для гілок з електронною провідністю (*n* – тип), **ТВДХ-1** і **ТВДХ-2** – для гілок з дірковою провідністю (*p* – тип).

Переваги термоелектричного охолодження:

- 1) простота конструкції;
- 2) можливість перемикання напрямку теплових потоків без використання додаткових пристроїв (перехід від режиму холодильної машини до режиму теплового насосу);
- 3) відсутність рухомих частин (значна надійність);
- 4) повна безшумність;
- 5) відсутність будь-якої робочої речовини і мастила;
- 6) менші масо-габаритні показники при такій холодопродуктивності (у 1,7 – 1,8 рази менші за масою порівняно з фреоновими холодильними машинами, і у 3 рази менші за об'ємом; для аміачної холодильної машини у 4 рази менші за об'ємом).

Недоліки термоелектричного охолодження:

- 1) низький ККД (порівняно з парокомпресійними холодильними машинами (найбільш поширений тип холодильних машин і теплових насосів) на 20–50 %);
- 2) висока вартість термоелементів (через високу вартість напівпровідників).

Приклади застосування. Термоелектричні холодильні машини знайшли велику кількість застосувань: охолодження мікроелектроніки, охолодження

повітря (кондиціонування), напоїв та створення охолоджувальних об'ємів, охолодження та термостатування медикаментів, вакцин та сироваток, компонентів крові тощо. На рис. 9.5 можна побачити зовнішній вигляд автомобільного холодильника для створення охолоджувального об'єму, який буде розглянуто у цьому практичному занятті.



Рисунок 9.5 – Автомобільний холодильник

ЗАВДАННЯ

Розрахувати коефіцієнт перетворення COP термоелектричного холодильного циклу, потужність P , що споживається термоелементом та тепловий потік Q_T , що відводиться гарячим спаєм, якщо відомо, що температура довкілля $t_{н.с}$, $^{\circ}C$, температура у холодильній камері $t_{кам}$, $^{\circ}C$. Диференціальний коефіцієнт термо-ЕРС спаїв $\alpha = 3 \cdot 10^{-4} \text{ В} / \text{К}$. Коефіцієнт теплопровідності гілок термоелементу (електродів) $\lambda = 5 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$. Довжина електродів δ , мм. Густина струму у електродах $j = 1,2 \cdot 10^7 \text{ А} / \text{м}^2 = 12 \text{ А} / \text{мм}^2$. Розміри електродів однакові і складають $1 \times 0,5 \text{ мм}$. Питомий опір матеріалу електроду $\rho = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Недорекуперацію по гарячій і холодній стороні спаїв взяти такою, що дорівнює $\Delta t_{HP} = 10^{\circ}C$.

Невідомі вихідні дані взяти з табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Вихідні дані до завдання

Варі- ант	$t_{н.с},$ $^{\circ}C$	$t_{кам},$ $^{\circ}C$	$\alpha \times 10^{-4},$ B / K	$\lambda,$ $\frac{Вт}{м \cdot K}$	$\delta,$ $мм$	$j \times 10^6,$ $A / м^2$	$a \times b,$ $мм \times мм$	$\rho \times 10^{-5},$ $Ом \cdot м$
1	20	6	3,8	1,40	1,6	0,90	$1,4 \times 1,4$	1,10
2	21	5	3,9	1,42	1,7	0,95	$1,4 \times 1,5$	1,12
3	22	4	3,9	1,44	1,7	1,00	$1,5 \times 1,5$	1,14
4	23	3	4,0	1,45	1,8	1,05	$1,5 \times 1,6$	1,16
5	24	2	4,0	1,46	1,8	1,10	$1,6 \times 1,6$	1,18
6	25	1	4,1	1,48	1,9	1,15	$1,6 \times 1,7$	1,20
7	26	0	4,1	1,50	1,9	1,20	$1,7 \times 1,7$	1,22
8	27	-1	4,1	1,51	2,0	1,25	$1,7 \times 1,8$	1,24
9	28	-2	4,2	1,52	2,0	1,30	$1,8 \times 1,8$	1,26
10	29	-3	4,2	1,53	2,1	1,35	$1,8 \times 1,9$	1,28
11	30	-4	4,2	1,55	2,1	1,40	$1,9 \times 1,9$	1,30
12	24	4	3,8	1,43	1,6	1,00	$1,5 \times 1,5$	1,15
13	25	3	3,9	1,45	1,7	1,05	$1,5 \times 1,6$	1,17
14	26	2	4,0	1,47	1,8	1,10	$1,6 \times 1,6$	1,19
15	27	1	4,0	1,49	1,9	1,20	$1,6 \times 1,7$	1,22
16	28	0	4,1	1,52	2,0	1,30	$1,7 \times 1,8$	1,25
17	30	-2	4,2	1,55	2,1	1,45	$1,8 \times 1,8$	1,30
18	31	-4	4,2	1,57	2,2	1,55	$1,9 \times 1,9$	1,33
19	32	-6	4,3	1,59	2,2	1,65	$2,0 \times 2,0$	1,36
20	33	-8	4,3	1,61	2,3	1,75	$2,0 \times 2,1$	1,39
21	34	-10	4,4	1,63	2,4	1,85	$2,1 \times 2,1$	1,42
22	35	-12	4,4	1,65	2,4	1,95	$2,2 \times 2,2$	1,45

ПРИКЛАД

Розрахувати коефіцієнт перетворення COP термоелектричного холодильного циклу, потужність P , що споживається термоелементом та тепловий потік Q_{Γ} , що відводиться гарячим спаєм, якщо відомо, що температура довкілля $t_{н.с} = 20^{\circ}C$, температура у холодильній камері $t_{кам} = 0^{\circ}C$. Диференціальний коефіцієнт термо-ЕРС спаїв $\alpha = 3 \cdot 10^{-4} B / K$. Коефіцієнт теплопровідності гілок термоелементу (електродів) $\lambda = 5 Bm / (m \cdot K)$. Довжина електродів $\delta = 0,01 m$. Густина струму у електродах $j = 1,2 \cdot 10^7 A / m^2 = 12 A / mm^2$. Розміри електродів однакові і складають $1 \times 0,5 mm$. Питомий опір матеріалу електроду $\rho = 1,3 \cdot 10^{-5} Om \cdot m$. Недорекуперацію по гарячій і холодній стороні спаїв взяти такою, що дорівнює $\Delta t_{HP} = 10^{\circ}C$.

Розрахунок

На рис. 9.4 подано принципову схему термоелементу.

Площа поперечного перерізу електроду

$$F = a \cdot b = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 10^{-6} m^2.$$

Струм у електродах

$$I = j \cdot F = 2 \cdot 10^7 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} = 10 A.$$

Опір електроду

$$R = \rho \cdot \frac{\delta}{F} = 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,01}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 0,26 Om.$$

Теплота Джоуля

$$Q_{дж} = I^2 \cdot R = 10^2 \cdot 0,065 = 0,65 Bm.$$

Температура холодного спаю

$$T_X = t_{кам} - \Delta t_{HP} + 273 = 0 - 10 + 273 = 263 K.$$

Температура гарячого спаю

$$T_{\Gamma} = t_{н.с} + \Delta t_{HP} + 273 = 20 + 10 + 273 = 303 K.$$

Теплота, що передається у місцях контакту (спаях) за рахунок теплопровідності

$$Q_T = \lambda \cdot (T_\Gamma - T_X) / \delta \cdot F = 5 \cdot (303 - 263) / 0,01 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} = 0,01 \text{ Вт}.$$

Тепловий потік, що відводиться гарячим спаєм (відводиться у довкілля):

$$Q_\Gamma = \alpha \cdot T_\Gamma \cdot I + 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot (T_\Gamma - T_X) / \delta \cdot F = \\ = \alpha \cdot T_\Gamma \cdot I + 0,5 \cdot Q_{дж} - Q_T = 3 \cdot 10^{-4} \cdot 303 \cdot 10 + 0,5 \cdot 0,65 - 0,01 = 1,22 \text{ Вт}.$$

Холодопродуктивність термоелементу

$$Q_0 = Q_\pi - 0,5 \cdot Q_{дж} - Q_T = \alpha \cdot T_X \cdot I - 0,5 \cdot Q_{дж} - Q_T = \\ = 3 \cdot 10^{-4} \cdot 263 \cdot 10 - 0,5 \cdot 0,65 - 0,01 = 0,454 \text{ Вт}.$$

Потужність, що споживається термоелементом

$$P = I^2 \cdot R + \alpha \cdot (T_\Gamma - T_X) \cdot I = \\ = Q_{дж} + \alpha \cdot (T_\Gamma - T_X) \cdot I = 0,65 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot (303 - 263) \cdot 10 = 0,77 \text{ Вт}.$$

Коефіцієнт термотрансформації холодильного циклу

$$COP = \frac{Q_0}{P} = \frac{0,454}{0,77} = 0,59.$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає фізична сутність термоелектричного охолодження?
2. Що таке ефект Пельтьє і яку роль він відіграє у роботі термоелектричної холодильної машини?
3. Що таке ефект Томсона і за яких умов він проявляється?
4. Яке призначення р-п-переходів у термоелектричних елементах?
5. Які основні теплові процеси враховують під час розрахунку термоелемента?
6. Що характеризує холодопродуктивність термоелемента?
7. Від яких параметрів залежить потужність, що споживається термоелементом?
8. Що показує коефіцієнт перетворення холодильного циклу COP?
9. Які вимоги висувають до матеріалів термоелементів?
10. Які основні переваги та недоліки термоелектричних холодильних машин порівняно з парокомпресійними?

Практична робота № 10

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОНАГРІВАЛЬНОЇ ПЕЧІ

Мета роботи: набути практичних навичок теплотехнічного та електротехнічного розрахунку електронагрівної печі для нагрівання сталевих виробів перед гартуванням; навчитися визначати корисну потужність печі, теплові втрати через багатошарову ізоляцію, потужність у стаціонарному та пусковому режимах, температуру зовнішньої поверхні, коефіцієнт корисної дії, а також основні параметри нагрівальних елементів із ніхромового дроту.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Електронагрівні печі належать до теплотехнічних установок, у яких електрична енергія перетворюється на теплову і використовується для нагрівання металів, заготовок, деталей або технологічної оснастки до заданої температури. Однією з поширених сфер застосування таких печей є термічна обробка сталі, зокрема нагрівання перед гартуванням. Якість теплового процесу в печі визначається не лише здатністю забезпечити необхідну температуру робочого простору, а й економічністю установки, рівномірністю нагрівання, стійкістю теплового режиму, допустимою температурою зовнішніх поверхонь та надійністю роботи нагрівальних елементів. Саме тому розрахунок електропечі має комплексний характер і поєднує теплові, конструктивні та електричні аспекти.

Основою такого розрахунку є тепловий баланс. Енергія, що підводиться до печі, витрачається на корисний нагрів металевих виробів, на покриття теплових втрат через стінки та на нагрівання власної маси печі під час виходу з холодного стану на робочий режим. Корисна частина теплоти визначається масою завантажених деталей, їх теплоємністю та різницею між початковою і кінцевою температурами. У даній практичній роботі об'єктом нагрівання є сталеві стрижні, тому спочатку визначають їх загальну масу за геометричними розмірами та густиною сталі, а далі – кількість теплоти, потрібну для доведення металу до температури гартування. Відношення цієї кількості теплоти до

тривалості нагрівання дає корисну потужність печі. Такий показник характеризує мінімально необхідний рівень підведення енергії без урахування неминучих втрат у навколишнє середовище.

Проте реальна піч завжди має теплові втрати. Вони виникають унаслідок теплопровідності через футерівку та теплоізоляцію, а також внаслідок тепловіддачі з зовнішньої поверхні печі в навколишнє середовище. У наданій методиці ізоляція печі складається з двох шарів: шамотної цегли та вермикулітового наповнювача. Така будова є технологічно доцільною, оскільки шамот забезпечує механічну міцність і жаростійкість внутрішньої частини футерівки, а вермикуліт виконує функцію ефективного теплоізолятора, знижуючи тепловий потік до зовнішньої стінки. Під час розрахунку визначають площі внутрішньої, проміжної та зовнішньої поверхонь, після чого за еквівалентною схемою теплопередачі знаходять теплові втрати від бічної поверхні печі. У спрощеній методиці внутрішньою тепловіддачею до стінки нехтують, що дає змогу зосередити увагу на головних опорах теплопередачі – шарах ізоляції та зовнішній тепловіддачі.

Сума корисної потужності й теплових втрат визначає потрібну потужність печі в стаціонарному режимі. Саме в цьому режимі температура в робочому просторі є усталеною, а кількість енергії, що підводиться, компенсує теплові втрати і забезпечує нагрівання чергової партії виробів. Однак для періодично діючої печі цього недостатньо. Після холодного пуску значна частина енергії витрачається на нагрівання самої конструкції печі – передусім шамотної кладки, шару вермикуліту та жаростійких елементів, розміщених у робочому просторі. Тому окремо обчислюють додаткові втрати теплоти на нагрівання масивних частин печі. У такому випадку розглядають середні температури окремих шарів і за їх теплоємністю та масою знаходять кількість теплоти, потрібну для розігріву конструкції. Це дає змогу оцінити пусковий режим і визначити, скільки часу триватиме вихід печі на робочий тепловий стан.

Важливим показником роботи електропечі є коефіцієнт корисної дії. Для гарячої печі ККД визначається співвідношенням корисно використаної теплоти до загальної підведеної потужності в стаціонарному режимі. Для холодної печі

ККД, як правило, є нижчим, оскільки поряд із нагріванням виробів потрібно витратити значну кількість енергії на розігрів самої печі. Порівняння ККД холодного і гарячого станів дозволяє оцінити енергетичну доцільність періодичної експлуатації та зрозуміти, наскільки істотними є пускові втрати. З цієї точки зору тепловий розрахунок печі є необхідним не лише для визначення потужності, а й для оцінювання ефективності її роботи в реальних умовах експлуатації.

Окремий етап практичної роботи пов'язаний із розрахунком нагрівальних елементів. У поданій методиці передбачено використання круглого ніхромового дроту та живлення від мережі 400/230 В. Ніхром є поширеним матеріалом електронагрівачів завдяки достатньо високому питомому електричному опору, жаростійкості, стабільності властивостей за тривалої роботи при підвищених температурах і технологічності під час виготовлення спіралей. Розрахунок нагрівачів передбачає визначення потужності фази, струму одного елемента, вибір діаметра дроту та його перерізу, перевірку фактичної температури нагрівача, визначення довжини дроту, геометрії спіралі та орієнтовного терміну її служби. Такі розрахунки потрібні для того, щоб нагрівач забезпечував задану потужність, не перегрівався і мав прийнятний ресурс роботи.

Температура нагрівального елемента є одним із ключових параметрів, оскільки саме вона визначає довговічність ніхрому та безпечність режиму. Якщо фактична температура перевищує допустиме значення для матеріалу, можливі прискорене окиснення, зменшення механічної міцності, зміна електричного опору і передчасний вихід спіралі з ладу.

ЗАВДАННЯ

Розрахувати теплові втрати печі для нагрівання з метою гартування сталевих стрижнів діаметром d , мм, і довжиною l , мм. У піч одночасно укладається m деталей, між деталями та тепловою ізоляцією має бути зазор 110–140 мм. Тривалість нагрівання τ , год. Температура гартування t_k , °С.

Теплова ізоляція складається з двох шарів: перший шар товщиною $\delta_{Ш}, мм$ з шамотних цеглин, другий шар – вермикулітова засипка товщиною $\delta_B, мм$.

Необхідно **визначити**:

- 1) корисну потужність;
- 2) величину теплових втрат;
- 3) потужність печі в стаціонарному режимі;
- 4) температуру зовнішньої стінки печі;
- 5) додаткові втрати під час нагрівання печі з холодного стану;
- 6) визначити ККД холодної та гарячої печі.

Вихідні дані наведені у табл. 10.1.

Таблиця 10.1 – Вихідні дані до роботи

Варіант	$d,$ <i>мм</i>	$l,$ <i>мм</i>	$n,$ <i>шт.</i>	Зазор, <i>мм</i>	Тривалість нагрівання, <i>год</i>	Температура гартування, °C	Товщина шамоту, <i>мм</i>	Товщина вермикуліту, <i>мм</i>
1	40	250	16	110	1,2	840	65	180
2	45	280	14	115	1,3	850	65	200
3	50	300	12	120	1,4	860	65	220
4	55	320	12	125	1,5	860	65	250
5	60	350	10	130	1,6	870	65	250
6	65	380	10	135	1,7	870	65	280
7	70	400	8	140	1,8	880	65	280
8	75	420	8	110	1,9	880	65	300
9	80	450	8	115	2,0	890	90	250
10	85	480	6	120	2,1	890	90	280
11	90	500	6	125	2,2	900	90	300
12	42	270	15	130	1,25	845	65	200
13	48	290	13	135	1,35	855	65	220
14	52	310	12	140	1,45	860	65	250
15	58	340	11	110	1,55	865	65	250

Продовження табл. 10.1

Варіант	d , мм	l , мм	n , шт.	Зазор, мм	Тривалість нагрівання, год	Температура гартування, °C	Товщина шамоту, мм	Товщина вермикуліту, мм
16	62	360	10	115	1,65	870	90	250
17	68	390	9	120	1,75	875	90	280
18	72	410	8	125	1,85	880	90	280
19	78	440	7	130	1,95	885	90	300
20	82	470	6	135	2,05	890	90	300
21	88	520	6	140	2,15	900	120	300
22	95	550	5	140	2,30	900	120	320

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

1 Визначення корисної потужності

1.1 Загальна маса стрижнів

$$m = n \cdot \gamma \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l,$$

де n – кількість деталей;

γ – густина сталі;

d – діаметр деталі, дм;

l – довжина деталі, м.

1.2 Кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання деталей

$$Q = c \cdot m \cdot (t_k - t_n),$$

де c – теплоємність сталі;

t_k – кінцева температура (температура загартовування), °C;

t_n – початкова температура, °C;

1.3 Корисна потужність

$$P_{\text{пол}} = \frac{Q}{3600 \cdot \tau}.$$

2 Розрахунок теплових втрат

2.1 Площа зовнішньої (бічної) поверхні печі

$$F_H = 2(b_1 \cdot c_1 + a_1 \cdot c_1 + b_1 \cdot a_1).$$

2.2 Площа зовнішньої поверхні шамотної кладки

$$F_{III} = 2(a_2 b_2 + c_2 b_2 + a_2 c_2).$$

2.3 Площа внутрішньої (бічної) поверхні печі

$$F_B = 2(a_3 \cdot b_3 + b_3 \cdot c_3 + c_3 \cdot a_3)$$

$$F_B = 2 \cdot (0,67 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,67) = 1,37 \text{ м}^2.$$

2.4 Умовна площа поверхні шамотної кладки за її осередненим розміром

$$F_{CP,III} = \sqrt{(F_{III} \cdot F_B)}.$$

2.5 Умовна площа поверхні вермикулітової засипки за її осередненим розміром

$$F_{CP,B} = \sqrt{F_{III} \cdot F_H}.$$

2.6 Теплові втрати від бічної поверхні печі

$$P_{\text{пот}} = \frac{t_K - t_H}{\frac{1}{\alpha_H \cdot F_H} + \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III} \cdot F_{CP,III}} + \frac{\delta_B}{\lambda_B \cdot F_{CP,B}} + \frac{1}{\alpha_B \cdot F_B}},$$

де $\alpha_H = 12 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}$; для цегляних та пофарбованих металевих стін при $t = 40\text{--}60 \text{ °С}$:

λ_B – теплопровідність вермикуліту;

λ_{III} – теплопровідність шамоту;

δ_{III} – товщина ізоляції шамотної цегли;

δ_B – товщина ізоляції вермикулітового наповнювача.

Тепловіддачу до внутрішньої стінки печі не враховуємо, тобто $(\alpha_B \cdot F_B)^{-1} = 0$.

2.7 Тепловий потік, необхідний для нагрівання деталей у стаціонарному режимі

$$P = P_{\text{пол}} + P_{\text{пот}}.$$

3 Розрахунок температури зовнішньої стінки печі

3.1 Температура між шарами повинна бути нижчою за допустиму робочу температуру для обраного типу ізоляції

$$t_{CL} = t_K - P_{\text{пот}} \cdot \frac{\delta_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}} \cdot F_{\text{ср.ш}}}.$$

Умова $t_{CL} < t_{\text{доп}}$ для вибору ізоляції.

3.2 Температура зовнішньої стінки печі

$$t_{CT} = t_H + \frac{P_{\text{пот}}}{\alpha_H \cdot F_H}.$$

4 Розрахунок додаткових втрат під час нагрівання холодної печі (періодичний режим)

4.1 Середня температура шамотної кладки

$$t_{\text{ср.ш}} = \frac{t_K + t_{CL}}{2}.$$

4.2 Середня температура вермикуліту

$$t_{\text{ср.в}} = \frac{t_{CT} + t_{CL}}{2}.$$

4.3 Кількість теплової енергії для нагрівання шамотної кладки

$$Q_{\text{ш}} = c_{\text{ш}} \cdot m_{\text{ш}} (t_{\text{ср.ш}} - t_H)$$

де $C_{\text{ш}}$ – теплоємність шамоту,

$$C_{\text{ш}} = 0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_{\text{ср.ш}}}{2} \right)$$

$m_{\text{ш}}$ – маса шамоту

$$m_{\text{ш}} = j_{\text{ш}} \cdot F_{\text{ср.ш}} \cdot \delta_{\text{ш}},$$

$j_{\text{ш}}$ – густина шамоту.

4.4 Кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання вермикулітового наповнювача

$$Q_B = c_B \cdot m_B (t_{\text{ср.в}} - t_H),$$

де C_B – теплоємність вермикуліту; $C_B = 0,63 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$;

m_B – маса вермикуліту, кг;

j – густина вермикуліту

$$m_B = j_B \cdot F_{CP,B} \cdot \delta_B,$$

де δ_B – товщина.

4.5 Кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання жаростійких виробів

$$Q_{Ж} = c_{Ж} \cdot m_{Ж} (t_K - t_H),$$

де $c_{Ж}$ – теплоємність жаростійких виробів

$$m_{Ж} = 0,25 \cdot m_{СТ},$$

де $m_{СТ}$ – маса стрижнів.

4.6 Загальна кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання конструкції печі

$$\sum Q_{КОНСТР} = Q_{Ш} + Q_B + Q_{Ж}.$$

4.7 Тривалість нагрівання печі

$$\tau = \frac{\sum Q_{КОНСТР.}}{3600 \left(P - \frac{P_{ПОТ}}{2} \right)}.$$

4.8 ККД печі

$$\eta = \frac{P_{ПОЛ}}{P_{ПОЛ} + P_{ПОТ}}.$$

5 Розрахунок нагрівальних елементів для печі

Напругу мережі задають 400/230 В.

Матеріал нагрівальних елементів – круглий ніхром.

5.1 Потужність фази нагрівального елемента

$$P_H = \frac{P}{m \cdot n},$$

де m – кількість фаз;

n – кількість нагрівачів на фазу.

5.2 Сила струму нагрівача

$$I_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{U_H},$$

де U_H – напруга, що подається на нагрівач, В

5.3 Вибір перетину дроту

Приймаємо робочу температуру. За знайденим значенням сили струму та робочою температурою t_p визначаємо діаметр d , мм та переріз S , мм² ніхромового дроту.

5.4 Фактична температура

$$t_\phi = \frac{t_p}{K_M \cdot K_C},$$

де K_M – коефіцієнт, що враховує умови монтажу дроту; якщо спіраль укладена в пазах шамотної цегли (типовий випадок) $K_M = 0,5$;

K_C – коефіцієнт, що враховує умови середовища навколо дроту, $K_C = 1,1$.

Для нормальної роботи нагрівача необхідне виконання умови $t_\phi < t_{\text{доп}}$, де $t_{\text{доп}}$ – допустима робоча температура матеріалу нагрівача; для ніхрому $t_{\text{доп}} = 1200^\circ \text{C}$.

5.5 Довжина дроту на один нагрівальний елемент

$$l_H = \frac{U_H \cdot S}{I_H \cdot \rho_t},$$

де ρ_t – питомий електричний опір матеріалу ніхромового дроту при фактичній температурі

$$\rho_t = \rho_{20} \left[1 + \alpha (t_\phi - 20) \right],$$

де ρ_{20} – питомий електричний опір при 20°C ;

α – температурний коефіцієнт електричного опору.

5.6 Термін експлуатації нагрівача

$$\tau = \tau' \cdot \kappa' \cdot d,$$

де κ' – коефіцієнт, що враховує форму перерізу нагрівача для круглого дроту $\kappa' = 1$;

τ' – термін служби нагрівача з дроту;

d – діаметр дроту, мм.

5.7 Діаметр спіралі

$$D_{\text{сп}} = 10 \cdot d \text{ при } d > 3 \text{ мм};$$

$$D_{сп} = 8 \cdot d \text{ при } d \geq 3 \text{ мм};$$

$$D_{сп} = 6 \cdot d \text{ при } d < 3 \text{ мм}.$$

5.8 Крок спіралі

$$h = 2 \cdot d \text{ при } d \geq 3 \text{ мм};$$

$$h = 3 \cdot d \text{ при } d \leq 3 \text{ мм}.$$

5.9 Кількість витків спіралі

$$W = \frac{l_H \cdot 10^3}{\sqrt{(\pi \cdot D_{сп})^2 + h^2}}.$$

5.10 Довжина спіралі

$$l_{сп} = W \cdot h.$$

ПРИКЛАД

Розрахувати теплові втрати печі для нагрівання з метою гартування сталевих стрижнів діаметром $d = 80 \text{ мм}$, і довжиною $l = 350 \text{ мм}$. У піч одночасно укладається $m = 6$ деталей, між деталями та тепловою ізоляцією має бути зазор $110\text{--}140 \text{ мм}$. Тривалість нагрівання $\tau = 2 \text{ год}$. Температура гартування $t_k = 870^\circ \text{ C}$.

Теплова ізоляція складається з двох шарів: перший шар товщиною $\delta_{ш} = 65 \text{ мм}$ з шамотних цеглин, другий шар – вермикулітова засипка товщиною $\delta_B = 250 \text{ мм}$.

Необхідно **визначити**:

- 1) корисну потужність;
- 2) величину теплових втрат;
- 3) потужність печі в стаціонарному режимі;
- 4) температуру зовнішньої стінки печі;
- 5) додаткові втрати під час нагрівання печі з холодного стану;
- 6) визначити ККД холодної та гарячої печі.

Розрахунок

1 Визначення корисної потужності

1.1 Загальна маса стрижнів

$$m = 6 \cdot 7,8 \cdot \frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} \cdot 3,5 = 82,3 \text{ кг},$$

де n – кількість деталей; $m = 6$

γ – густина сталі, $\gamma = 7800 \text{ кг} / \text{м}^3 = 7,8 \text{ кг} / \text{дм}^3$,

d – діаметр деталі, дм; $d = 0,8 \text{ дм}$;

l – довжина деталі, м; $l = 3,5 \text{ дм}$,

1.2 Кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання деталей

$$Q = 0,482 \cdot 82,3 \cdot (870 - 20) = 33930 \text{ кДж},$$

де c – теплоємність сталі, $C = 0,482 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$;

t_k – кінцева температура (температура загартовування), °C; $t_k = 870$ °C (за завданням);

t_n – початкова температура, °C; $t_n = 20$ °C (за завданням),

1.3 Корисна потужність

$$P_{\text{пол}} = \frac{Q}{3600 \cdot \tau}; P_{\text{пол}} = \frac{33930}{3600 \cdot 2} = 4,91 \text{ кВт}.$$

2 Розрахунок теплових втрат

2.1 Площа зовнішньої (бічної) поверхні печі

$$F_H = 2(0,93 \cdot 1,13 + 1,23 \cdot 1,13 + 0,93 \cdot 1,23) = 7,14 \text{ м}^2$$

2.2 Площа зовнішньої поверхні шамотної кладки

$$F_{\text{ш}} = 2(0,73 \cdot 0,43 + 0,63 \cdot 0,73 + 0,73 \cdot 0,63) = 2,94 \text{ м}^2.$$

2.3 Площа внутрішньої (бічної) поверхні печі

$$F_B = 2 \cdot (0,67 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,67) = 1,37 \text{ м}^2.$$

2.4 Умовна площа поверхні шамотної кладки за її осередненим розміром

$$F_{\text{ср.ш}} = \sqrt{(2,09 \cdot 1,37)} = 1,69 \text{ м}^2.$$

2.5 Умовна площа поверхні вермикулітової засипки за її осередненим розміром

$$F_{\text{ср.в}} = \sqrt{2,09 \cdot 7,17} = 3,87 \text{ м}^2.$$

2.6 Теплові втрати від бічної поверхні печі з урахуванням того, що тепловіддачею до внутрішньої стінки печі не враховуємо, тобто $(\alpha_B \cdot F_B)^{-1} = 0$

$$P_{\text{пот}} = \frac{870 - 20}{\frac{1}{12 \cdot 7,17} + \frac{0,065}{1,25 \cdot 1,69} + \frac{0,25}{0,15 \cdot 3,87}} = 1,78 \text{ кВт},$$

де $\alpha_H = 12 \text{ Вт/(м}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$;

для цегляних і металевих пофарбованих стін при $t = 40\text{--}60 \text{ } ^\circ\text{C}$:

λ_B – теплопровідність вермикуліту, $\lambda_B = 0,15 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C}$;

λ_{III} – теплопровідність шамоту, $\lambda_{III} = 1,25 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C}$;

δ_{III} – товщина ізоляції шамотної цегли, $\delta_{III} = 65 \text{ мм}$;

δ_B – товщина ізоляції вермикулітового наповнювача, $\delta_B = 250 \text{ мм}$.

2.7 Тепловий потік, необхідний для нагрівання деталей у стаціонарному режимі

$$P = 4,7 + 1,78 = 6,5 \text{ кВт}.$$

3 Розрахунок температури зовнішньої стінки печі

3.1 Температура між шарами повинна бути нижчою за допустиму робочу температуру для обраного типу ізоляції

$$t_{\text{сш}} = 870 - 1730 \cdot \frac{0,065}{1,25 \cdot 1,69} = 813^\circ \text{C}.$$

Відповідно до довідкових даних для вермикуліту $t_{\text{доп}} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Умова $t_{\text{сш}} < t_{\text{доп}}$ для ізоляції виконується.

3.2 Температура зовнішньої стінки печі

$$t_{\text{ст}} = 20 + \frac{1780}{12 \cdot 7,17} = 41^\circ \text{C}.$$

4 Розрахунок додаткових втрат під час нагрівання холодної печі (періодичний режим)

4.1 Середня температура шамотної кладки

$$t_{\text{ср.ш}} = \frac{870 + 813}{2} = 842^\circ \text{C}.$$

4.2 Середня температура вермикуліту

$$t_{CP.B} = \frac{813 + 41}{2} = 427^{\circ} C.$$

4.3 Кількість теплової енергії для нагрівання шамотної кладки

$$C_{III} = 0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_{CP.III}}{2} \right) =$$

$$= 0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 421 = 0,89 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot K);$$

де теплоємність шамоту

$$c_{III} = 0,89 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot K);$$

густина шамоту

$$j_{III} = 2580 \text{ кг/м}^3 = 2,58 \text{ кг/дм}^3;$$

маса шамоту

$$m_{III} = 2,58 \cdot 1,69 \cdot 0,065 = 0,27 \text{ т} = 270 \text{ кг};$$

$$Q_{III} = 0,89 \cdot 270 \cdot (842 - 20) = 195000 \text{ кДж}.$$

4.4 Кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання вермикулітового наповнювача

Відповідно до завдання $\delta_B = 250 \text{ мм}$, тоді

$$m_B = 0,25 \cdot 3,87 \cdot 0,25 = 0,24 = 240 \text{ кг},$$

де C_B – теплоємність вермикуліту, $C_B = 0,63 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot K)$;

m_B – маса вермикуліту, кг;

j – густина вермикуліту,

$$J_B = 0,25 \text{ кг/дм}^3 = 0,25 \text{ т/м}^3;$$

де δ_B – товщина вермикуліту,

тоді

$$Q_B = 0,63 \cdot 240 (426 - 20) = 60000 \text{ кДж}.$$

4.5 Кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання жаростійких виробів

$$m_{Ж} = 0,25 \cdot m_{СТ} = 20 \text{ кг},$$

де $m_{СТ}$ – маса стрижнів,

тоді

$$Q_{ж} = 0,432 \cdot 20(870 - 20) = 8200 \text{ кДж},$$

де $C_{ж}$ – теплоємність жаростійких виробів, $C_{ж} = 0,432 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$.

4.6 Загальна кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання конструкції печі

$$\sum Q_{\text{констр}} = 195000 + 60000 + 8200 = 263200 \text{ кДж}.$$

4.7 Тривалість нагрівання печі при потужності 6,5 кВт

$$\tau = \frac{263200}{3600 \left(605 - \frac{1,78}{2} \right)} = 1,320 \text{ год}.$$

4.8 ККД електропечі

$$\eta = \frac{4,7}{4,7 + 1,78} = 0,723.$$

5 Розрахунок нагрівальних елементів для печі

Напругу мережі беремо 400 В.

Матеріал нагрівальних елементів – круглий ніхром.

5.1 Потужність фази нагрівального елемента

$$P_H = \frac{6,5}{3 \cdot 1} = 2,14 \text{ кВт}.$$

5.2 Сила струму нагрівача

$$I_H = \frac{2140}{380} = 5,4 \text{ А}.$$

5.3 Вибір перетину дроту

Як матеріал спіралі беремо ніхром Х20Н80-Н.

Приймаємо робочу температуру 600 °С. За знайденим значенням сили струму та робочою температурою t_p визначаємо діаметр $d, \text{мм}$ та переріз $S, \text{мм}^2$ ніхромового дроту:

$$S = 0,95 \text{ мм}^2; d = 1,1 \text{ мм}.$$

5.4 Фактична температура

Для нормальної роботи нагрівача необхідне виконання умови $t_{\phi} < t_{\text{доп}}$, де $t_{\text{доп}}$ – допустима робоча температура матеріалу нагрівача; для ніхрому $t_{\text{доп}} = 1200^{\circ}\text{C}$

$$t_{\phi} = \frac{600}{0,5 \cdot 1,1} = 1091^{\circ}\text{C},$$

де K_M – коефіцієнт, що враховує умови монтажу дроту; якщо спіраль укладена в пазах шамотної цегли (типовий випадок) $K_M = 0,5$;

K_C – коефіцієнт, що враховує умови середовища навколо дроту, $K_C = 1,1$.

5.5 Довжина дроту на один нагрівальний елемент

$$l_H = \frac{400 \cdot 0,95 \cdot 10^{-6}}{5,4 \cdot 22,74 \cdot 10^{-6}} = 2,8\text{м},$$

де ρ_t – питомий електричний опір матеріалу ніхромового дроту при фактичній температурі

$$\rho_t = 1,1 \cdot 10^{-6} (1 + 16,5 \cdot 10^{-6} (1270 - 20)) = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{Ом} \cdot \text{м},$$

$\rho_{20} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{Ом} \cdot \text{м}$ – питомий електричний опір при 20°C .

5.6 Термін експлуатації нагрівача

$$\tau = 1 \cdot 1480 \cdot 1 = 1480 \text{год},$$

де κ' – коефіцієнт, що враховує форму перерізу нагрівача для круглого дроту $\kappa' = 1$.

τ' – термін служби нагрівача з дроту діаметром $1,1 \text{мм}$,

5.7 Діаметр спіралі

$$D_{\text{сп}} = 6 \cdot 1,1 = 6,6 \text{мм}.$$

5.8 Крок спіралі

$$h = 3 \cdot 1,1 = 3,3 \text{мм}.$$

5.9 Кількість витків спіралі

$$W = \frac{2,8 \cdot 10^3}{\sqrt{(3,14 \cdot 6,6)^2 + 3,3^2}} = 90 \text{ витків}.$$

5.10 Довжина спіралі

$$l_{сп} = 90 \cdot 3,3 = 297 \text{ мм}.$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яке призначення електронагрівної печі в процесі термічної обробки сталевих виробів?
2. Що розуміють під корисною потужністю електropечі та як її визначають?
3. Які основні складові входять до теплового балансу електронагрівної печі?
4. Чому в печі застосовують багатошарову ізоляцію з шамоту та вермикуліту?
5. Від чого залежать теплові втрати через стінки печі?
6. Для чого визначають температуру зовнішньої стінки печі?
7. Чому під час пуску холодної печі потрібна додаткова витрата теплоти?
8. У чому полягає різниця між ККД холодної та гарячої печі?
9. Чому для нагрівальних елементів електropечей часто використовують ніхром?
10. Які основні параметри нагрівального елемента необхідно визначити під час його розрахунку?

Практична робота № 11

РОЗРАХУНОК УСТАНОВКИ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ

Мета роботи: набуття здобувачами теоретичних знань і практичних навичок з розрахунку установки індукційного нагрівання циліндричних металевих заготовок, визначення основних електричних, теплових і конструктивних параметрів індукційного нагрівача, а також оцінювання впливу матеріалу заготовки, її геометричних розмірів, температурного режиму та продуктивності установки на енергетичні показники процесу нагрівання.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Робота установки індукційного нагрівання базується на використанні закону електромагнітної індукції Фарадея-Максвелла і закону Джоуля-Ленца. Індуктор створює змінне електромагнітне поле, в якому знаходиться тіло нагрівання. Відповідно до закону електромагнітної індукції в струмопровідному тілі нагрівання індукується ЕРС E_2 , B , величина якої визначається за формулою:

$$E_2 = 4,44\Phi_m\omega_2 f \cdot 10^{-8},$$

де Φ_m – максимальне значення магнітного потоку, який створює індуктор, $Вб$;

ω_2 – кількість послідовно з'єднаних витків, які створюють контур тіла нагрівання (як правило, $\omega_2 = 1$);

f – частота струму джерела живлення індуктора, $Гц$.

Під дією ЕРС E_2 у тілі нагрівання проходять вихрові струми розсіювання (струми Фуко) I_2 , A , що визначаються за формулою:

$$I_2 = E_2 \sqrt{R_2^2 + X_2^2},$$

де X_2 – реактивний опір тіла нагрівання, $Ом$;

R_2 – активний опір, $Ом$, тіла нагрівання, що визначається за формулою:

$$R_2 = \rho_m \frac{l}{F},$$

де l – довжина середнього шляху проходження вихрових струмів у тілі нагрівання, m ;

F – площа поперечного перерізу тіла нагрівання, m^2 ;

ρ_m – питомий опір матеріалу тіла нагрівання при температурі t , $Om \cdot m$.

Питомий опір ρ_m тіла нагрівання залежить від його температури t .

Відповідно до закону Джоуля-Ленца у струмопровідному тілі нагрівання під час проходження по ньому струму буде виділятися тепло. Потужність P_m, Wt , що передається тілу нагрівання, визначається за формулою:

$$P_m = I_2^2 R_2 = I_2^2 R_2',$$

де I_2 – сила струму в обмотці індуктора, A ;

R_2' – активний опір, Om , тіла нагрівання, зведений до параметрів обмотки індуктора і визначається (за умови, що $w_2 = 1$) за формулою:

$$R_2' = R_2 \omega_1^2,$$

де ω_1 – кількість витків обмотки індуктора.

Отже, теплова енергія, що виділяється у тілі нагрівання, пропорційна квадрату сили струму в індукторі і залежить від багатьох факторів, головними серед яких є: електричний опір матеріалу тіла нагрівання, його магнітна проникність, частота струму, геометричні розміри тіла нагрівання та індуктора тощо.

Збільшення кількості тепла, що виділяється в тілі нагрівання при індукційному нагріванні, на практиці в основному досягається двома способами. При першому способі намагаються максимально зменшити опір магнітному потоку на тих ділянках, де він не проходить по тілу нагрівання. Цього досягають завдяки використанню металевого магнітопроводу (осердя). При другому способі збільшується частота струму, для чого живлення індуктора здійснюється від високочастотного джерела живлення.

Глибина проникнення магнітного потоку (вихрового струму) у метал, а отже, і товщина h, m , шару нагрівання приблизно визначається за формулою Штейнметца:

$$h = 503 \sqrt{\frac{\rho_m}{\mu f}},$$

де μ – відносна магнітна проникність матеріалу тіла нагрівання.

Відповідно до виразу для глибини проникнення магнітного потоку h при високих частотах струму (до 1000 Гц і більше) можна отримати тонкий нагрітий шар, наприклад, для поверхневої термічної обробки виробу. При низьких частотах (наприклад, 50 Гц) можна забезпечити наскрізне нагрівання виробу.

Показником ефективності роботи установок індукційного нагрівання є електричний ККД η_e , що визначається за формулою:

$$\eta_e = \frac{P_m}{P_1 + P_m},$$

де P_1 – втрати потужності, Вт, в індукторі, що визначаються за формулою:

$$P_1 = I_1^2 R_1,$$

де R_1 – активний опір індуктора, Ом.

З урахуванням цього кінцева формула для визначення електричного ККД буде мати вигляд:

$$\eta_e = \frac{R_2'}{R_1 + R_2'}.$$

При збільшенні відношення діаметра заготовки до глибини проникнення тепла під час індукційного нагрівання електричний ККД зростає, а термічний ККД зменшується. Ця обставина дозволяє для кожного діаметра заготовки встановити смугу частот струму, в межах якої повний ККД, що дорівнює добутку електричного і термічного коефіцієнтів корисної дії, має досить високе значення (табл. 11.1).

При наскрізному (глибинному) індукційному нагріванні сталених круглих виробів для забезпечення високого ККД установки і виключенню оплавлення поверхні виробів, частота струму, кГц, повинна складати

$$\frac{30}{d_B^2} < f < \frac{60}{d_B^2},$$

де d_B – діаметр виробу, що нагрівається, см.

Таблиця 11.1 – Діаметри заготовок, для індукційного нагрівання яких можуть бути використані стандартні частоти струму

Частота струму, Гц	50	500	1000	2500	8000	Радіо-частота
Діаметри заготовок, мм, рекомендовані	250 і більше	95–135	65–95	40–60	25–35	20 і менше
допустимі	150 і більше	70–160	50–120	30–80	15–40	20 і менше

До головних енергетичних показників індукційних установок також належить коефіцієнт потужності, що визначається за формулою:

$$\cos \varphi = \frac{R_c}{Z_c},$$

де R_c – сумарний активний опір, Ом, індукційної установки відповідно до схеми заміщення, що визначається за формулою:

$$R_c = R_1 + R_2';$$

Z_c – сумарний повний опір, Ом, індукційної установки відповідно до схеми заміщення, що визначається за формулою:

$$Z_c = \sqrt{R_c^2 + X_c^2},$$

де X_c – сумарний реактивний опір, Ом, індукційної установки відповідно до схеми заміщення, що визначається за формулою:

$$X_c = X_1 + X_2',$$

де X_1 – реактивний опір індуктора, Ом;

X_2' – реактивний опір, Ом, тіла нагрівання, що приведений до параметрів обмотки індуктора і визначається (за умови, що $\omega_2 = 1$) за формулою:

$$X_2' = X_2 \omega_1^2.$$

З урахуванням попередніх виразів кінцева формула для визначення коефіцієнта потужності індукційної установки матиме вигляд:

$$\cos \varphi = \frac{R_1 + R_2'}{\sqrt{R_c^2 + X_c^2}} = \frac{R_2'}{\eta_e Z_c}.$$

З метою розвантаження перетворювача частоти від реактивної (індуктивної) складової струму навантаження, яка в кілька разів перевищує активну складову, а також з метою підвищення коефіцієнта потужності і ККД установки, паралельно до первинної обмотки знижувального трансформатора підключають компенсуючу батарею конденсаторів відповідної ємності.

Одинична потужність типових ЕНУ індукційного нагріву, що використовуються в сільському господарстві, становить 40–250 κBm з тиристорними або машинними перетворювачами частоти при частотах від 0,5 до 8 $\kappaГц$ і ламповими – при частотах понад 60 $\kappaГц$.

Приклади позначення установок: ВЧІ-40/0,44-ЗП – високо-частотна індукційна установка потужністю 40 κBm , з робочою частотою 440 $\kappaГц$, для загартування поверхонь (ЗП); ВЧГ1-100/0,066-НС – високочастотний генератор першої підсерії потужністю 100 κBm , з робочою частотою 66 $\kappaГц$, для наскрізного нагрівання (НС). Шкала потужностей установок: 1; 4; 6; 10; 25; 40; 60; 100; 160; 200 κBm .

ЗАВДАННЯ

Виконати розрахунок індукційного нагрівача для нагрівання в електромеханічному цеху мірних циліндричних заготовок відповідно до вихідних даних (табл. 11.2):

1. Матеріал заготовок;
2. Діаметр заготовки d_2 ;
3. Довжина заготовки l_2 ;
4. Інтервал часу, через який необхідно подавати нагріті заготовки до кувальних механізмів або на термообробку τ_k .
5. Температура поверхні нагрітої заготовки t_k .

6. Допустимий температурний перепад по перерізу заготовки Δt .

Таблиця 11.2 – Вихідні дані до завдання

Варіант	Матеріал заготовки	d_2 , мм	l_2 , мм	τ_k , с	t_k , °C	Δt , °C
1	Сталь 20	25	70	10	900	50
2	Сталь 20	30	80	12	920	60
3	Сталь 35	35	90	14	950	60
4	Сталь 35	40	100	15	980	70
5	Сталь 45	45	110	16	1000	70
6	Сталь 45	50	120	18	1020	80
7	Сталь 40X	60	120	20	1050	80
8	Сталь 40X	70	130	22	1080	90
9	Сталь 50	80	140	24	1100	90
10	Сталь 45	90	120	20	1150	100
11	Сталь 45	100	120	20	1200	100
12	Сталь 20X	110	140	22	1050	90
13	Сталь 20X	120	160	24	1080	100
14	Сталь 40X	130	180	26	1100	100
15	Сталь 40X	140	180	28	1120	110
16	Сталь 65Г	150	200	30	1150	110
17	Сталь ШХ15	160	220	32	1180	120
18	Латунь Л63	30	75	11	700	40
19	Мідь М1	40	90	12	750	50
20	Алюмінієвий сплав АД31	50	100	14	500	35
21	Сталь У8А	60	110	16	860	70
22	Сталь 12Х18Н10Т	100	180	28	1050	90

ПРИКЛАД

Виконати розрахунок індукційного нагрівача для нагрівання в електромеханічному цеху мірних циліндричних заготовок відповідно до вихідних даних:

1. Матеріал заготовок – сталь 45;
2. Діаметр заготовки $d_2 = 100$ мм;
3. Довжина заготовки $l_2 = 120$ мм;
4. Інтервал часу, через який необхідно подавати нагріті заготовки до кувальних механізмів або на термообробку $\tau_k = 20$ с.
5. Температура поверхні нагрітої заготовки $t_k = 1200^\circ \text{C}$.
6. Допустимий температурний перепад по перерізу заготовки $\Delta t = 100^\circ \text{C}$.

Розрахунок

Величини, що характеризують індукційний нагрівний пристрій, визначаються за такою методикою та з використанням довідкових даних:

1. частота вибирається відповідно до таблиці $f = 1000 \text{ Гц}$.
2. тривалість нагріву заготовок вибирається за графіками $\tau_n = 300 \text{ с}$.
3. напруга на індукторі задаємо $U = 750 \text{ В}$.
4. Питомий електричний опір:
 - міді при 40°C $\rho_1 = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$;
 - сталі при 1200°C $\rho_2 = 130 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.
5. Маса заготовки

$$G = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot l_2 \cdot \rho = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \cdot 12 \cdot 7,8 = 7,3 \text{ кг},$$

де ρ – густина матеріалу заготовки; для сталі 45 $\rho = 7,8 \text{ кг} / \text{дм}^3$.

6. Глибина проникнення струму в мідь індуктора при температурі 40°C (Δ_1) і в сталь заготовки при температурі 1200°C (Δ_2) визначаються за формулами:

$$\Delta_1 = \frac{0,07}{\sqrt{f}} = \frac{0,07}{\sqrt{1000}} = 0,0022 \text{ м} = 2,2 \text{ мм};$$

$$\Delta_2 = \frac{0,6}{\sqrt{f}} = \frac{0,6}{\sqrt{1000}} = 0,019\text{ м} = 19\text{ мм}.$$

7. Розміри індуктора:

а) кількість заготовок, що нагріваються одночасно

$$n = \frac{\tau_n}{\tau_k} = \frac{300}{20} = 15\text{ шт.}$$

б) внутрішній діаметр індуктора d_1 визначається діаметром заготовки d_2 і товщиною електричної і теплової ізоляції, остання з умови отримання високого ККД нагрівача беруть таким, що дорівнює 2,5–5,0 см

$$d_1 = d_2 + (2,5-5,0)\text{ см}.$$

У даному випадку

$$d_1 = d_2 + 5 = 10 + 5 = 15\text{ см};$$

в) довжина індуктора визначається за формулою:

$$l_1 = n \cdot l_2 + \Delta l; \Delta l = (1-2)d_1.$$

У даному випадку

$$l_1 = n \cdot l_2 + 2 \cdot d_1 = 15 \cdot 12 + 2 \cdot 15 = 210\text{ см}.$$

Залежно від умов роботи нагрівача і наявності місця у цеху може бути прийнято два рішення.

1) встановити один індуктор довжиною 210 см;

2) встановити два індуктора довжиною удвічі меншою.

У першому випадку нагрівач буде мати велику довжину, у другому – велику ширину і більшу кількість механізмів і електротехнічної апаратури.

Розглянемо розрахунок індуктора довжиною 210 см. У випадку прийняття другого рішення необхідний виконати розрахунок за таким самим алгоритмом, враховуючи, що при визначенні довжини індуктора кількість заготовок в індукторі має бути взятою такою, що дорівнює вісім.

Активні і реактивні складові власного опору індуктора, віднесені до однофазового індуктора і наведеного опору заготовок, визначаються так:

а) власний активний опір індуктора

$$R_1 = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1}{l_1 \cdot \Delta_1} = 1,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 15}{210 \cdot 0,22} = 1,94 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

б) наведений активний опір заготовки

$$R_2' = 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot \frac{d_2^2 \cdot A}{n \cdot l_2} = 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 \cdot \frac{10^{-8} \cdot 0,3}{15 \cdot 12} = 10,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

де функція $A = f(p)$ характеризує вплив відношення діаметра заготовки до глибини проникнення струму у нагріту сталь на величину наведеного активного опору заготовки, знаходиться за кривими, наведеними на рис. 11.1.

$$p = \frac{d_2}{\sqrt{2} \cdot \Delta_2} = \frac{10}{\sqrt{2} \cdot 1,9} = 3,7;$$

$$x_1' = 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot \frac{d_1^2}{l_1} \cdot (1 - B) = 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 \cdot \frac{15^2}{210} \cdot (1 - 0,4) = 66 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

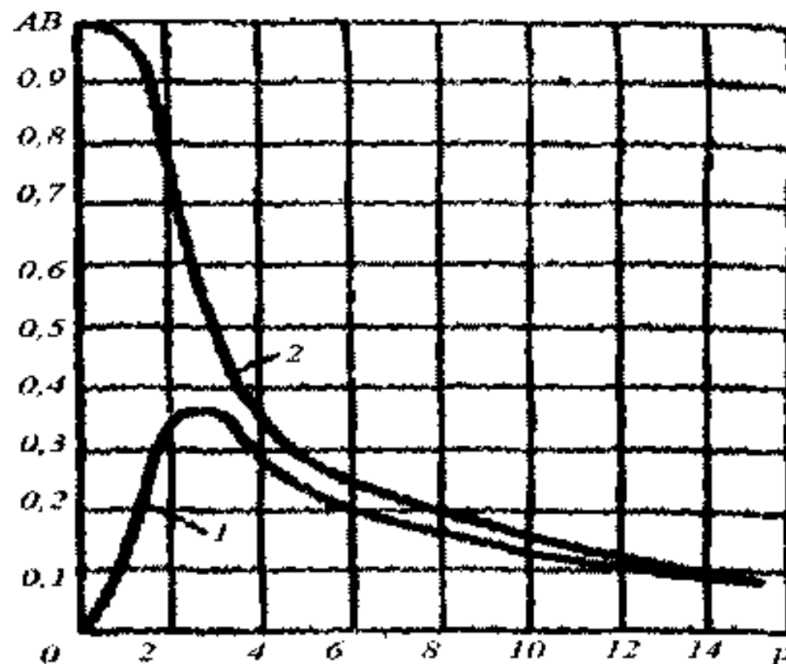


Рисунок 11.1 – Криві залежності функції A і B від параметра p :

1 – функція A ; 2 – функція B

г) наведений реактивний опір заготовки

$$\begin{aligned} x_2' &= 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot \frac{d_2^2}{n \cdot l_2} \cdot (1 - B) = \\ &= 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 \cdot \frac{10^2}{15 \cdot 12} \cdot (1 - 0,4) = 20,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де $B = f(p) = 0,4$ (з кривих рис. 11.1).

Еквівалентні складові повного опору індуктора, віднесені до одного витка:

$$R'_3 = R'_1 + R'_2 = 1,94 \cdot 10^{-6} + 10,3 \cdot 10^{-6} = 12,24 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$x'_3 = x'_1 - x'_2 = 66 \cdot 10^{-6} - 20,6 \cdot 10^{-6} = 45,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

Опір індуктора, відносно до одного витка

$$z'_2 = \sqrt{(R'_3)^2 + (x'_3)^2} = \sqrt{(12,24 \cdot 10^{-6})^2 + (45,4 \cdot 10^{-6})^2} = 47,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт потужності індуктора

$$\cos \varphi = \frac{R'_3}{z'_2} = \frac{12,24 \cdot 10^{-6}}{47,5 \cdot 10^{-6}} = 0,26.$$

Електричний ККД індуктора

$$\eta_e = \frac{R'_2}{R'_3} = \frac{10,3 \cdot 10^{-6}}{0,84 \cdot 10^{-6}} = 0,84.$$

Термічний ККД η_t , при розглянутих умовах може бути може бути взятий таким, що дорівнює 0,9.

Повний ККД нагрівальної установки

$$\eta = \eta_e \cdot \eta_t = 0,84 \cdot 0,9 = 0,76.$$

Середня потужність, що розвивається під час навантаження у процесі нагрівання

$$P_n = \frac{c \cdot t_k \cdot G \cdot n}{0,24 \cdot t_n} = \frac{0,17 \cdot 1200 \cdot 7,3 \cdot 15}{0,24 \cdot 300} = 310 \text{ кВт},$$

де c – питома теплоємність сталі $0,17 \text{ ккал} / (\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) = 0,712 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$.

Потужність, що підводиться до індуктора

$$P_i = \frac{P_n}{\eta} = \frac{310}{0,76} = 410 \text{ кВт}.$$

Кількість витків індуктора

$$\omega = \frac{U}{z'_2} \cdot \sqrt{\frac{R'_3}{P_i \cdot 10^3}} = \frac{750}{47,5 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{\frac{12,24 \cdot 10^{-6}}{410 \cdot 10^3}} = 87 \text{ витків}.$$

Струм індуктора

$$I_U = \frac{U}{\omega^2 z_2'} = \frac{750}{87^2 \cdot 47,5 \cdot 10^{-6}} = 2080 A.$$

Ширина трубки по осі індуктора

$$a = \frac{I_1 \cdot K_3}{\omega + 1} = \frac{210 \cdot 0,8}{87 + 1} = 1,9 \text{ см} = 19 \text{ мм},$$

де K_3 – коефіцієнт заповнення, враховує наявність відмінності електричної ізоляції між витками, як правило задають таким, що дорівнює 0,8.

Товщина стінки трубки

$$b = 1,35 \Delta_1 = 1,35 \cdot 0,22 = 0,3 \text{ см} = 3 \text{ мм}.$$

21. Радіальна висота трубки, обчислюється після визначення площі F трубки, достатньої для пропускання необхідної кількості води

$$F = \frac{P_U \cdot (1 - \eta)}{c_w \cdot w \cdot (t_1 - t_0)} = \frac{410 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,76)}{4,19 \cdot 120 \cdot (40 - 18)} = 9 \text{ см}^2 = 900 \text{ мм}^2,$$

де w – швидкість руху води по трубці індуктора (при тиску 1,5–2 атм беруть такою, що дорівнює 1,2 м/с = 120 см/с);

c_w – питома теплоємність води; $c_w = 4,19 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$;

t_0 – температура води, що входить в індуктор, °С;

t_1 – температура води, що виходить з індуктора, °С.

Висота трубки при послідовному пропусканні води через всі витки індуктора:

$$h_{\Sigma} = \frac{F}{a - 2b} + 2b = \frac{900}{19 - 2 \cdot 3} + 2 \cdot 3 = 75 \text{ мм}.$$

Доцільно котушку індуктора розділити на п'ять паралельних гілок охолодження, тоді

$$h = \frac{h_{\Sigma}}{z} = \frac{75}{5} = 15 \text{ мм}.$$

Отже, котушка виготовляється з трубки із зовнішніми розмірами перерізу 19х15 мм і з товщиною стінки 3 мм. Трубки прямокутного перерізу отримують волочінням з круглих трубок.

Густина струму в індукторі

$$\delta = \frac{I_U}{a \cdot \Delta_1} = \frac{2080}{19 \cdot 2,2} = 50 A / \text{мм}^2.$$

Струм генератора

$$I_T = I_U \cdot \cos \varphi = 2080 \cdot 0,26 = 540 A.$$

Реактивна потужність конденсаторної батареї

$$Q_c = \frac{P_U}{\cos \varphi} = \frac{410}{0,26} = 1600 \text{кВАр}.$$

Кількість банок конденсаторної батареї при реактивній потужності одного конденсатора (типу ЕСС-750-1), 140 кВАр

$$N_c = \frac{1600}{140} = 12 \text{шт.}$$

Наведений розрахунок справедливий за умови, що відношення довжини індуктора до його діаметру $l_1 / d_1 > 5$, а відношення довжини індуктора до довжини заготовок близьке до одиниці, що, як правило, витримується в індукторах для наскрізного нагрівання металу перед тепловою обробкою.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які фізичні закони лежать у основі принципу роботи установки індукційного нагрівання?
2. У чому полягає принцип виникнення вихрових струмів у тілі нагрівання?
3. Які основні фактори впливають на інтенсивність виділення теплоти під час індукційного нагрівання?
4. Що характеризує глибина проникнення магнітного потоку в метал і від яких величин вона залежить?
5. Як частота струму впливає на товщину шару нагрівання заготовки?
6. За якими міркуваннями вибирають частоту струму для наскрізного нагрівання циліндричних заготовок?
7. Які параметри визначають геометричні розміри індуктора?
8. Як визначають електричний ККД та коефіцієнт потужності установки індукційного нагрівання?

9. З якою метою в схемі індукційної установки застосовують батарею конденсаторів?

10. Чому водяне охолодження індуктора є обов'язковим елементом роботи установки індукційного нагрівання?

Практична робота № 12

РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЗВАРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: засвоєння принципу дії зварювального трансформатора як джерела живлення дуги для ручного дугового зварювання, вивчення зв'язку між напругою, струмом, коефіцієнтом трансформації, параметрами магнітопроводу та режимом навантаження, а також формування вмінь аналізувати основні електромагнітні та енергетичні параметри такого джерела живлення в межах розрахункової моделі.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Зварювальний трансформатор є понижувальним електромагнітним пристроєм, призначеним для перетворення напруги мережі у відносно малу вторинну напругу та великий зварювальний струм, необхідний для живлення електричної дуги. У джерелах такого типу енергія передається з первинної обмотки до вторинної через магнітний потік у феромагнітному осерді. Для зварювальних процесів характерно, що на первинному боці маємо вищу напругу й менший струм, а на вторинному – нижчу напругу та значно більший струм. У зварювальних машинах трансформаторного типу вторинна напруга холостого ходу як правило не перевищує 80 В, тоді як зварювальний струм може сягати сотень ампер.

Для ручного дугового зварювання джерело живлення повинно мати спадну зовнішню вольт-амперну характеристику. Це потрібно для того, щоб при зміні довжини дуги зварювальний струм змінювався відносно помірно, а сам процес був стійкішим. У навчальних матеріалах із ручного дугового зварювання прямо зазначається, що для такого процесу використовують джерела з падаючою характеристикою. Саме тому в конструкції зварювальних трансформаторів застосовують рішення, які збільшують розсіювання магнітного потоку та створюють потрібну форму зовнішньої характеристики.

У роботі розглядається зварювальний трансформатор з рухомими обмотками, а на практиці зварювального обладнання також поширені

конструкції з рухомим магнітним шунтом. В обох випадках регулювання зварювального струму досягається зміною магнітного зв'язку між первинною і вторинною обмотками. За збільшення магнітного розсіювання еквівалентний індуктивний опір зростає, а струм у зварювальному колі зменшується і навпаки. Для трансформаторів серії ТДМ у паспортних матеріалах наведено саме такий принцип: магнітний шунт або відповідний регулювальний вузол змінює магнітний стан системи та забезпечує плавне регулювання струму.

Найважливішими параметрами зварювального трансформатора є номінальний зварювальний струм, номінальна робоча напруга вторинного кола, напруга холостого ходу, межі регулювання струму, тривалість навантаження, коефіцієнт трансформації, переріз магнітопроводу та струм первинної обмотки.

Напруга холостого ходу є важливою характеристикою, бо вона пов'язана із запалюванням дуги. Водночас вона є і небезпечною з точки зору електробезпеки, тому в паспортних документах на зварювальні трансформатори окремо підкреслюється, що дотик до елемента зварювального кола при холостому ході є небезпечним.

Тривалість навантаження $TН$ характеризує допустиму частку часу роботи трансформатора під навантаженням у стандартному циклі. Для зварювальних джерел це принципово, оскільки їх тепловий режим є повторно-короткочасним. Відповідно до технічних даних типових трансформаторів ТДМ значення ПН як правило 40–60 % залежно від моделі.

Переріз магнітопроводу визначає допустиму магнітну індукцію та енергетичні можливості трансформатора. Зі збільшенням потужності та струму зварювання зростають вимоги до осердя, кількості міді або алюмінію в обмотках, маси та габаритів обладнання. Саме тому трансформаторні джерела традиційно є більш габаритними та важкими за інверторні аналоги. Це пояснюється тим, що більший струм вимагає більшого трансформатора, а отже – більшої маси та розмірів машини.

Поширена практика виготовлення зварювальних трансформаторів середньої та великої потужності свідчить, що у них для первинної обмотки застосовується алюмінієвий провід марки АПСД, а для вторинної – алюмінієва

шина АДО, клас ізоляції – Н. Це визначається істотним впливом вартості, маси провідникового матеріалу та теплостійкості ізоляції. У паспортних документах типових трансформаторів ТДМ також описані виконання з алюмінієвими обмотками та природним повітряним охолодженням.

Отже, під час розрахунку зварювального трансформатора необхідно враховувати не лише електромагнітні співвідношення між витками, напругою і струмом, але й технологічні вимоги до ручного дугового зварювання: надійне запалювання дуги, спадну зовнішню характеристику, допустимий тепловий режим та достатню механічну і електричну міцність конструкції.

ЗАВДАННЯ

Розрахувати площу перерізу магнітопроводу S_c та номінальний струм первинної обмотки $I_{1ном}$ зварювального трансформатора з рухомими обмотками на струм $I_{2ном}$ для ручного дугового зварювання.

Тривалість навантаження $TН$. Первинна напруга $U_1 = 400 В$. Частота струму $50 Гц$.

Напруга холостого ходу: в діапазоні великих струмів $U_{2хх}, В$; в діапазоні малих струмів $U'_{2хх}, В$. Номінальна робоча напруга $U_{2ном}, В$. Межі регулювання зварювального струму: загальні – $(0,2-1,15) I_{2ном}$; у діапазоні великих струмів – $(0,5-1,15) I_{2ном}$; у діапазоні малих струмів – $(0,2-0,5) I_{2ном}$. Індукцією у магнітопроводі задатися B_m . Клас ізоляції Н. Обмоткові проводи: для первинної обмотки – алюмінієвий провід марки АПСД; для вторинної обмотки – шина алюмінієва марки АДО.

За результатами розрахунку виконати каталогове зіставлення отриманих параметрів з довідковими характеристиками серійних зварювальних трансформаторів і визначити найближчу модель.

Вихідні дані відповідно до варіанту наведені у табл. 12.1

Таблиця 12.1 – Вихідні дані для розрахунку

Варіант	$I_{2ном}, A$	$TH, \%$	$U_{2ном}, B$	U_{2xx}, B	U'_{2xx}, B	$B_m, Tл$
1	160	20	26	52	68	1,60
2	180	25	27	54	70	1,61
3	200	30	28	56	72	1,62
4	220	35	29	58	74	1,63
5	240	40	30	60	76	1,64
6	260	45	31	60	76	1,65
7	280	50	33	62	78	1,66
8	300	80	36	64	80	1,73
9	320	60	36	64	80	1,67
10	340	65	37	65	82	1,68
11	360	70	38	66	82	1,69
12	380	55	39	66	84	1,70
13	400	60	40	67	84	1,71
14	420	45	40	68	84	1,72
15	440	50	41	68	86	1,72
16	460	55	42	69	86	1,73
17	480	60	43	70	88	1,74
18	500	60	44	70	88	1,74
19	520	40	44	70	90	1,75
20	540	45	45	72	90	1,75
21	560	50	46	72	92	1,76
22	600	60	48	75	94	1,76

ПРИКЛАД

Розрахувати площу перерізу магнітопроводу S_c та номінальний струм первинної обмотки $I_{1ном}$ зварювального трансформатора з рухомими обмотками на струм 300 А для ручного дугового зварювання.

За результатами розрахунку виконати каталогове зіставлення отриманих параметрів з довідковими характеристиками серійних зварювальних трансформаторів і визначити найближчу модель.

Вихідні дані. Номінальний зварювальний струм $I_{2ном} = 300 \text{ А}$. Тривалість навантаження $TH = 80\%$. Первинна напруга $U_1 = 400 \text{ В}$. Частота струму 50 Гц .

Напруга холостого ходу: в діапазоні великих струмів $U_{2xx} = 64 \text{ В}$; в діапазоні малих струмів $U'_{2xx} = 80 \text{ В}$. Номінальна робоча напруга $U_{2ном} = 36 \text{ В}$. Межі регулювання зварювального струму: загальні – $60\text{--}345 \text{ А}$; у діапазоні великих струмів – $150\text{--}345 \text{ А}$; в діапазоні малих струмів – $60\text{--}150 \text{ А}$. Індукцією у магнітопроводі задатися $1,73 \text{ Тл}$. Клас ізоляції Н. Обмоткові проводи: для первинної обмотки – алюмінієвий провід марки АПСД; для вторинної обмотки – шина алюмінієва марки АДЮ.

Розрахунок

Мінімальний індуктивний опір, що забезпечує отримання максимального зварювального струму

$$x_{\min} = \frac{\sqrt{U_{2xx}^2 - U_{22xx}^2}}{I_{22}}.$$

Визначення кількості витків обмоток. Для визначення кількості витків обмоток скористаємося емпіричною формулою:

$$x_{\min} = \frac{\sqrt{U_{2xx}^2 - U_{22xx}^2}}{I_{22}} = \frac{\sqrt{64^2 - 33,8^2}}{345} = 0,158 \text{ Ом},$$

де I_{22} – верхня межа (максимальне значення) регулювання зварювального струму; $I_{22} = 345 \text{ А}$;

$U_{22xx} = 20 + 0,04 \cdot I_{22} = 20 + 0,04 \cdot 345 = 33,8 \text{ В}$ – найменше значення напруги холостого ходу, що відповідає максимальному значенню зварювального струму.

$$e_w = 0,55 + 0,095 \cdot S_{TP},$$

де e_w – параметр, що визначає скільки вольт припадає на один виток;

S_{TP} – повна потужність трансформатора, кВА

$$S_{TP} = U_{2xx} \cdot I_{2ном} \cdot \sqrt{0,01 \cdot TH} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 64 \cdot 300 \cdot \sqrt{0,01 \cdot 80} \cdot 10^{-3} = 17,173 \text{ кВА};$$

$$e_w = 0,55 + 0,095 \cdot 17,173 = 2,18 \text{ В / виток}.$$

Кількість витків первинної обмотки

$$w_1 = \frac{U_1}{e_w} = \frac{400}{2,18} = 174 \text{ витки}.$$

Кількість витків вторинної обмотки

$$w_2 = \frac{U_{2xx}}{e_w} = \frac{64}{2,18} = 29 \text{ витків}.$$

Кількість витків котушок. Первинна й вторинна обмотки складаються з двох котушок, з'єднаних на діапазоні великих струмів паралельно, тому

$$w_{1K} = w_1 = 174 \text{ витки}; w_{2K} = w_2 = 29 \text{ витків}.$$

Номінальний струм первинної обмотки

$$I_{1ном} = I_{2ном} \cdot \frac{K_\mu}{n},$$

де $k_\mu = 1,05 - 1,1$ – коефіцієнт, який враховує намагнічуючий струм трансформатора;

n – коефіцієнт трансформації,

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{174}{29} = 6;$$

$$I_{1ном} = 300 \cdot \frac{1,05}{6} = 52,5 \text{ А}.$$

Переріз магнітопроводу

$$S_c = \frac{U_{2xx} \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot B_m},$$

де f – частота струму, Гц;

$B_m = 1,73 \text{ Тл}$ – індукція у магнітопроводі,

$$S_c = \frac{64 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 29 \cdot 1,73} = 57,46 \text{ см}^2.$$

За довідковою таблицею серійних зварювальних трансформаторів найближчою за номінальним зварювальним струмом є модель ТДМ-303У2, для якої номінальний струм становить 315 А, номінальна робоча напруга – 33 В, тривалість навантаження – 60 %, а межі регулювання струму – 60–315 А.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Яке призначення зварювального трансформатора в колі ручного дугового зварювання?
2. Чому зварювальний трансформатор є понижувальним трансформатором?
3. Яке фізичне значення має коефіцієнт трансформації зварювального трансформатора?
4. Чому для ручного дугового зварювання потрібна спадна зовнішня характеристика джерела живлення?
5. Яку роль виконує напруга холостого ходу у роботі зварювального трансформатора?
6. Для чого в конструкції зварювального трансформатора застосовують регулювання магнітного розсіювання?
7. Які основні вихідні дані потрібні для розрахунку кількості витків обмоток?
8. Від яких чинників залежить площа перерізу магнітопроводу зварювального трансформатора?
9. Що характеризує тривалість навантаження $TН$ і чому вона є важливою для зварювального джерела?
10. Чому зі збільшенням номінального зварювального струму зростають маса та габарити трансформатора?

Практична робота № 13

РОЗРАХУНОК ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Мета роботи: закріплення теоретичних знань про джерела живлення установок електронно-іонної технології, вивчення принципу дії та методики розрахунку однонапівперіодної схеми множення напруги, а також набуття практичних навичок визначення параметрів високовольтних конденсаторів, підвищувального трансформатора та його основних конструктивних елементів за заданими значеннями вихідної напруги і струму навантаження.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Електронно-іонна технологія ґрунтується на дії сильних електричних полів на заряджені частинки дисперсного матеріалу з метою надання їм упорядкованого руху у потрібному напрямку. У сільськогосподарському виробництві такі процеси застосовують, зокрема, під час електроаерозольної обробки, осадження аерозолів, очищення повітря та інших електрофізичних процесів. Для реалізації цих технологій потрібні джерела живлення постійного струму з високою вихідною напругою.

Для живлення установок електронно-іонної технології, як правило, використовують джерела невеликої потужності з високою вихідною напругою у межах приблизно 10–100 кВ. Найбільше поширення отримали випрямлячі з множенням напруги, оскільки вони дають змогу отримати високу постійну напругу при відносно невисокій напрузі вторинної обмотки трансформатора.

У даній практичній роботі розглядається однонапівперіодна схема випрямляча з множенням напруги (рис. 13.1). Принцип її дії полягає у послідовному зарядженні конденсаторів у різні півперіоди напруги вторинної обмотки трансформатора, унаслідок чого вихідна напруга схеми у режимі холостого ходу зростає пропорційно числу каскадів множення. Для такої схеми напруга холостого ходу визначається як

$$U_{x.x} = 2nU_{2T},$$

де n – кількість каскадів множення;

U_{2T} – амплітудне значення напруги вторинної обмотки трансформатора.

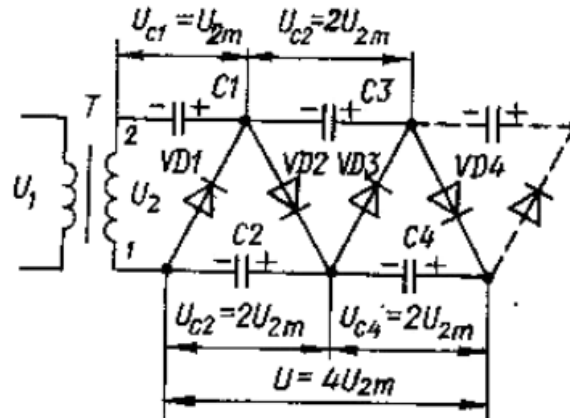


Рисунок 13.1 – Принципова однонапівперіодна схема випрямляча з множенням напруги

Під час навантаження джерела живлення на виході схеми множення виникає спад напруги, величина якого залежить від струму навантаження, частоти живлення, ємності конденсаторів та кількості каскадів. Тому ємність конденсаторів повинна бути достатньою для забезпечення допустимого зниження вихідної напруги під навантаженням. Під час розрахунку приймають, що номінальна напруга конденсаторів має бути не меншою за $2,85U_2$, а зворотна напруга напівпровідникових вентилів – такої самої величини.

Таблиця 13.1 – ККД трансформатора

Потужність на стороні вторинної обмотки, ВА	ККД
15–20	0,5–0,8
50–150	0,8–0,9
150–300	0,9–0,93
300–1000	0,93–0,95
понад 1000	0,95–0,98

Обов'язковим елементом такого джерела живлення є підвищувальний трансформатор. Його призначення полягає у створенні необхідної напруги на вході схеми множення. Величина магнітної індукції в осерді трансформатора як правило $B = 1,1 - 1,4 \text{ Тл}$, а у роботі взято більш консервативне значення $B = 1 \text{ Тл}$, Ефективність такого трансформатора залежить від його потужності на стороні вторинної обмотки (див. табл. 13.1).

Магнітопровід (осердя) трансформатора (рис. 13.2) розрізняють трьох типів: стержньовий, броньовий і тороїдний.

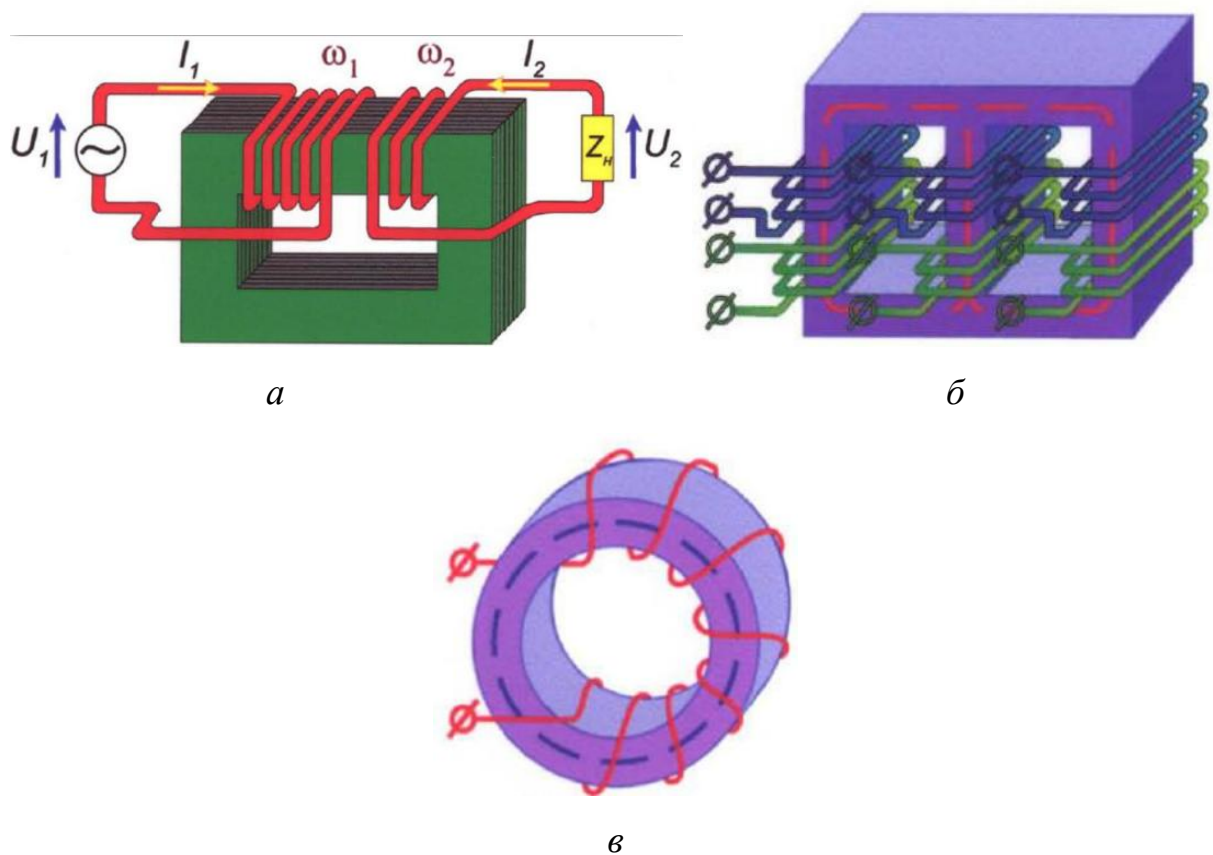


Рисунок 13.2 – Типи осердь трансформаторів:

а – стержневе; б – броньове; в – тороїдне

Стержньове осердя набирається з П-подібних ізольованих пластин трансформаторної сталі. Позначається стержньове осердя як

П 20Х45,

де П – тип осердя (стержньове);

20 – ширина стержня, мм;

45 – товщина пакета, мм.

Броньове осердя набирається із Ш-подібних пластин. Обмотки розташовуються концентрично на центральному стержні. Позначення

Ш 20Х45,

де Ш – тип осердя (броньове);

20 – ширина центрального стержня, мм,

45 – товщина пакета, мм.

Тороїдне осердя менш технологічне. Як правило тороїдне осердя виготовляється нешихтованим. Позначається осердя цього типу так:

О 60Х40Х10,

де О – тип осердя (тороїдне);

60 – зовнішній діаметр тора, мм,

40 – внутрішній діаметр осердя, мм,

10 – висота тора, мм.

У джерелах живлення установок електронно-іонної технології особливе значення мають питання безпеки. Високовольтні джерела повинні мати захист від коротких замикань і зникнення високої напруги, засоби контролю напруги та струму навантаження, захисний корпус, заземлення, блокувальні пристрої та автоматичне заземлення високовольтних елементів після зняття напруги. Тому під час розрахунку і подальшого вибору елементів потрібно враховувати не лише електричні параметри, а й вимоги електробезпеки.

ЗАВДАННЯ

Виконати розрахунок джерела живлення установки електронно-іонної технології на основі однонапівперіодної схеми множення напруги відповідно до вихідних даних, наведених у табл. 13.2.

У процесі виконання роботи необхідно:

- Визначити потужність навантаження джерела живлення.
- Визначити напругу на вторинній обмотці підвищувального трансформатора.
- Визначити робочу напругу високовольтних конденсаторів.

- Розрахувати ємність конденсаторів схеми множення напруги.
- Визначити коефіцієнт трансформації підвищувального трансформатора.
- Розрахувати первинну потужність трансформатора з урахуванням його ККД.
- Визначити площу перерізу стрижня магнітопроводу.
- Визначити основні геометричні розміри осердя трансформатора.
- Розрахувати струм у первинній обмотці трансформатора.
- Визначити перерізи проводів первинної та вторинної обмоток.
- Визначити кількість витків первинної та вторинної обмоток.
- Зробити висновок щодо відповідності отриманих параметрів вимогам до джерел живлення установок електронно-іонної технології.

Під час розрахунку прийняти: первинну напругу живлення $U_1 = 230\text{В}$, частоту струму $f = 50\text{Гц}$, коефіцієнт множення схеми $k = 3$, магнітну індукцію в осерді $B = 1\text{Тл}$, тип магнітопроводу – стержневий.

Таблиця 13.2 – Вихідні дані до розрахунку

Варіант	Вихідна напруга $U_0, \text{кВ}$	Струм навантаження $I_0, \text{мА}$	Варіант	Вихідна напруга $U_0, \text{кВ}$	Струм навантаження $I_0, \text{мА}$
1	15	10	12	40	20
2	18	12	13	40	30
3	20	15	14	45	15
4	22	18	15	45	25
5	25	20	16	45	40
6	28	25	17	50	15
7	30	30	18	50	25
8	30	50	19	50	35
9	32	20	20	55	20
10	35	25	21	60	15
11	35	35	22	60	25

ПРИКЛАД

Розрахувати та вибрати основні елементи джерела живлення установки електронно-іонної технології для однонапівперіодної схеми множення напруги (рис. 13.1).

Вихідні дані:

- вихідна напруга $U_0 = 30\text{кВ}$;
- струм навантаження $I_0 = 50\text{мА}$;
- первинна напруга живлення $U_1 = 230\text{В}$;
- частота струму $f = 50\text{Гц}$;
- коефіцієнт множення $k = 3$;
- ККД трансформатора $\eta = 0,95$;
- магнітна індукція в осерді $B_c = 1,0\text{Тл}$;
- тип магнітопроводу – стержневий.

Розрахунок

1) Потужність навантаження

$$P_0 = U_0 \cdot I_0 ;$$

$$P_0 = 30 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 1500\text{Вт} .$$

2) Напруга на вторинній обмотці трансформатора

$$U_2 = \frac{U_0}{k \cdot \sqrt{2}} ,$$

де k – коефіцієнт множення,

$$U_2 = \frac{30000}{3 \cdot \sqrt{2}} = 7071\text{В} .$$

3) Робоча напруга конденсатора C_1

$$U_{C1} = U_2 \sqrt{2} ;$$

$$U_{C1} = 7071 \cdot \sqrt{2} \approx 10000\text{В} .$$

4) Ємність конденсаторів

$$\text{Задають } C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C .$$

5) Ємність конденсатора C

$$C = \frac{1,6 \cdot 10^8 \cdot I_0 \cdot k}{U_0 \cdot f};$$

$$C = \frac{1,6 \cdot 10^8 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 3}{30000 \cdot 50} = 16,0 \text{ мкФ}.$$

6) Ємність конденсатора C_1

$$C_1 = 2 \cdot C;$$

$$C_1 = 2 \cdot 16,0 = 32,0 \text{ мкФ}.$$

7) Робоча напруга на конденсаторі

$$U_{C,роб} = 2 \cdot U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot K_3,$$

де $K_3 = 1,2 - 1,3$;

$$U_{C,роб} = 2 \cdot 7071 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,3 = 25920 \text{ В}.$$

Отже, треба вибирати конденсатори з робочою напругою не нижче 26 кВ.

8) Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$n = \frac{U_2}{U_1};$$

$$n = \frac{7071}{230} = 30,74.$$

9) Первинна потужність трансформатора

$$S_1 = \frac{P_0}{\eta},$$

де η – ККД трансформатора, який можна прийняти за табл. 1;

$$S_1 = \frac{1500}{0,95} = 1579 \text{ ВА}.$$

10) Переріз стержня магнітопроводу

10.1) Для трансформаторів стержневого типу

$$Q_c = \sqrt{S_1};$$

$$Q_c = \sqrt{1579} = 39,74 \text{ см}^2.$$

10.2) Для трансформаторів броньового типу

$$Q_c = 0,7 \cdot \sqrt{S_1};$$

$$Q_c = 0,7 \cdot \sqrt{1579} = 27,82 \text{ см}^2.$$

Беремо трансформатор стержневого типу

$$Q_c \approx 40 \text{ см}^2.$$

11) Товщина пакета пластин

Задаємося прямокутним перерізом стержня

$$Q_c = a \cdot b.$$

Задаємося шириною пластини $a = 5 \text{ см}$, тоді

$$b = \frac{Q_c}{a};$$

$$b = \frac{39,74}{5} = 7,95 \approx 8 \text{ см}.$$

Перевірка

$$\frac{b}{a} = \frac{8}{5} = 1,6,$$

що входить у рекомендовані межі співвідношення розмірів для осердя $b/a = 1,5 - 2,0$.

Задаємося прямокутним перерізом стержня.

12) Висота стержня

$$H_c = (2,5 - 3,5)a;$$

$$H_c = 3 \cdot a = 3 \cdot 5 = 15 \text{ см}.$$

13) Ширина вікна сердечника

$$C = \frac{H_c}{K},$$

де K – коефіцієнт, що враховує найвигідніші розміри вікна сердечника, $K = 2,5 - 3$

$$C = \frac{15}{3} = 5 \text{ см}.$$

14) Електричний струм у первинній обмотці

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1};$$

$$I_1 = \frac{1579}{230} = 6,87 \text{ A}.$$

15) Переріз проводу первинної обмотки

$$q_1 = \frac{I_1}{j},$$

де j – густина струму в обмотці, $\text{A} / \text{мм}^2$.

Для силових трансформаторів внутрішнього встановлення густина струму не повинна перевищувати $j \leq 2 \text{ A} / \text{мм}^2$. При перерізі проводів $q_1 \geq 10 \text{ мм}^2$ для обмотки трансформатора необхідно використовувати провід прямокутної форми. Задаємося $j = 1,5 \text{ A} / \text{мм}^2$, тоді

$$q_1 = \frac{6,87}{1,5} = 4,58 \text{ мм}^2.$$

задаємося найближчий більший стандартний переріз проводу первинної обмотки $q_1 = 6 \text{ мм}^2$.

16) Кількість витків первинної обмотки

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot Q_c},$$

де B_c – величина магнітної індукції у сердечнику

$$W_1 = \frac{230 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,0 \cdot 40} = 259 \text{ витків}.$$

17) Переріз проводів вторинної обмотки

$$q_2 = \frac{I_0}{j};$$

$$q_2 = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{1,5} = 33 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2.$$

За струмовим навантаженням отримане значення є малим, тому під час практичного виконання вторинної обмотки вибір проводу треба уточнювати з урахуванням вимог високовольтної ізоляції.

18) Кількість витків вторинної обмотки

$$W_2 = W_1 \cdot \frac{U_2}{U_1};$$

$$W_2 = 259 \cdot \frac{7071}{230} = 7960 \text{ витків.}$$

У результаті розрахунку для джерела живлення установки електронно-іонної технології при $U_0 = 30 \text{ кВ}$ і $I_0 = 50 \text{ мА}$ визначено, що потужність навантаження становить 1500 Вт , напруга вторинної обмотки трансформатора – $7,07 \text{ кВ}$, ємність основних конденсаторів схеми множення – 16 мкФ , ємність конденсатора $C_1 = 32 \text{ мкФ}$, робоча напруга конденсаторів має бути не нижчою за 26 кВ , коефіцієнт трансформації трансформатора дорівнює $30,74$, первинна потужність трансформатора – 1579 ВА , переріз стержня магнітопроводу – близько 40 см^2 , кількість витків первинної обмотки – 259 , а вторинної – 7960 .

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає призначення джерела живлення установки електронно-іонної технології?
2. Чому для установок електронно-іонної технології потрібні джерела постійного струму з високою вихідною напругою?
3. Який принцип дії однонапівперіодної схеми множення напруги?
4. Від яких параметрів залежить вихідна напруга схеми множення в режимі холостого ходу?
5. Чому при навантаженні схеми множення виникає спад напруги?
6. За якими міркуваннями вибирають робочу напругу конденсаторів високовольтної схеми?
7. Яке призначення підвищувального трансформатора в джерелі живлення установки електронно-іонної технології?
8. Від яких величин залежить площа перерізу осердя трансформатора?
9. Як визначають кількість витків первинної та вторинної обмоток трансформатора?
10. Які основні заходи електробезпеки необхідно передбачати у високовольтних джерелах живлення установок електронно-іонної технології?

Практична робота № 14

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ТА СОРТУВАННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ

Мета роботи: набуття практичних навичок розрахунку основних конструктивних і режимних параметрів камерного електростатичного сепаратора для очищення та сортування насіннєвого матеріалу, визначення потрібної напруженості електричного поля і робочої напруги між електродами, розрахунку активної ширини живильника, часу перебування частинок у робочій зоні та оцінювання умов забезпечення надійного розділення насіння і домішок за різницею їх питомого заряду.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Електростатична сепарація ґрунтується на відмінностях електрофізичних властивостей частинок суміші. Для насіннєвого матеріалу це можуть бути різна електропровідність, діелектрична проникність, форма, маса, вологість і, як наслідок, різні значення питомого заряду q/m . У полі коронного розряду частинки набувають заряду, після чого під дією електричної сили змінюють траєкторію руху, що дає змогу розділяти насіння основної культури, щупле насіння, легкі органічні домішки та інші включення. Для сепарації насіння найчастіше використовують поле негативного уніполярного коронного розряду, де час заряджання частинки становить близько 0,01 с.

У практиці застосовують кілька конструктивних схем електросепараторів: камерні, коронні барабанні, коронні транспортерні, сепаратори типу «гірка», пластинчасті коронні та комбіновані сепаратори з електростатичним і коронним розрядом. Для насіння сферичної або близької до сферичної форми придатні камерні сепаратори, а для очищення насіння зернових, овочевих культур і видалення легких домішок часто застосовують коронні барабанні сепаратори. Наприклад, продуктивність камерних сепараторів складає до 400 кг/год і робоча напруга – до 30 кВ.

У більш точних моделях траєкторія частинки в сепараторі визначається дією сили тяжіння, електростатичної сили та аеродинамічного опору. Для вільнопадаючих електростатичних сепараторів якість розділення безпосередньо пов'язана з відношенням заряду до маси частинок Q/m .

У даній роботі розглядається спрощена інженерна модель камерного електростатичного сепаратора з однорідним міжелектродним полем. Вважаємо, що частинки в зоні сепарації мають малу початкову швидкість, а відхилення траєкторій визначається переважно різницею питомого заряду $\beta=q/m$. Така модель дає змогу встановити зв'язок між геометрією робочої зони, напруженістю поля, робочою напругою та умовою розділення фракцій.

Для заданої продуктивності сепаратора спочатку визначають масову подачу матеріалу

$$G = \frac{Q}{3600},$$

де G – масова подача, $кг/с$;

Q – продуктивність сепаратора, $кг/год$.

Активну ширину живильника визначають за допустимим поверхневим навантаженням на шар матеріалу:

$$B = \frac{G}{q_F v_F},$$

де B – активна ширина живильника, $м$;

q_F – допустиме поверхнєве навантаження на живильник, $кг/(м^2 \cdot с)$;

v_F – швидкість подачі матеріалу, $м/с$.

Час перебування частинки у зоні вільного падіння висотою H визначають із співвідношення

$$\tau = \sqrt{\frac{2H}{g}},$$

де τ – час польоту частинки, $с$;

H – висота робочої камери, $м$;

$g=9,81 м/с^2$ – прискорення вільного падіння.

У горизонтальному напрямку частинка переміщується під дією електростатичної сили. Якщо

$$\beta = \frac{q}{m},$$

де β – питомий заряд частинки, Кл/кг, тоді горизонтальне прискорення дорівнює

$$a_x = \beta E,$$

де E – напруженість електричного поля, В/м.

За час падіння частинка зміщується вбік на відстань

$$x = 0,5 a_x \tau^2 = \frac{\beta E H}{g},$$

де x – горизонтальне відхилення траєкторії, м.

Для забезпечення розділення насіння основної культури та домішок необхідно, щоб різниця відхилень їх траєкторій була не меншою за мінімально допустимий крок розділення $\Delta x_{\min}$:

$$\Delta x = |x_d - x_n| \geq \Delta x_{\min},$$

де x_d – відхилення домішок, м;

x_n – відхилення насіння основної культури, м.

Звідси мінімально потрібна напруженість електричного поля

$$E_{\min} = \frac{x_{\min} g}{H \cdot |\beta_d - \beta_n|},$$

де β_d – питомий заряд домішок, Кл/кг;

β_n – питомий заряд насіння основної культури, Кл/кг.

Робочу напругу між електродами визначають за виразом

$$U = E \delta,$$

де U – робоча напруга, В;

δ – міжелектродний проміжок, м.

У розрахунках зручно використовувати питомий заряд у $\text{нКл} / \text{г}$, пам'ятаючи, що

$$1 \text{ нКл} / \text{г} = 10^{-6} \text{ Кл} / \text{кг}.$$

Для оцінювання положення роздільної перегородки між приймальними бункерами можна використовувати середнє значення:

$$x_{sep} = \frac{x_n + x_d}{2},$$

де x_{sep} – координата роздільної перегородки відносно осі симетрії робочої зони, м.

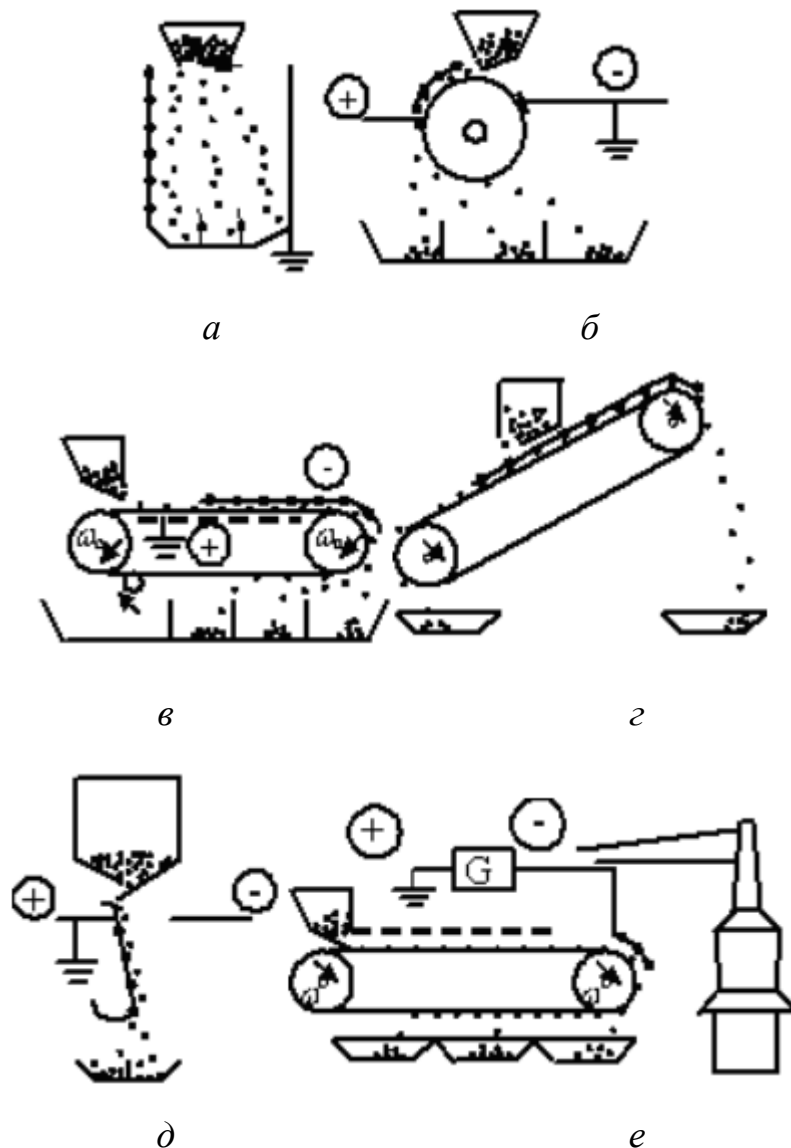
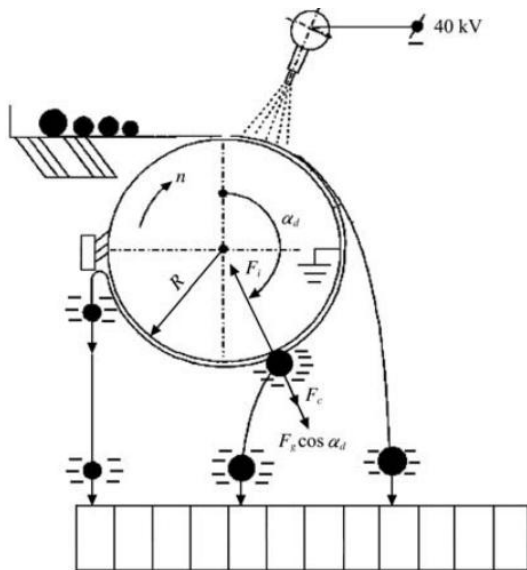


Рисунок 14.1 – Схеми електросепараторів:

а – камерний; б – коронний барабанний; в – коронний транспортерний;
г – сепаратор типу «гірка»; д – пластинчастий коронний; е – комбінований з
електростатичним і коронним розрядом

Якщо в результаті розрахунку $E_{min} > E_{dop}$, де E_{dop} – допустима напруженість поля для прийнятої конструкції, то необхідно змінити вихідні параметри:

збільшити висоту сепаратора H , зменшити потрібну відстань розділення $\Delta x_{\min}$, зменшити міжелектродний проміжок δ або застосувати схему з ефективнішим зарядженням частинок.



а



б

Рисунок 14.2 – Схема (а) і фотографія (б) лабораторного роликового коронного електростатичного сепаратора для насіння соняшнику

ЗАВДАННЯ

Виконати розрахунок камерного електростатичного сепаратора (рис. 14.1 а, 14.3) для очищення та сортування насіннєвого матеріалу відповідно до вихідних даних свого варіанта (табл. 14.1).

У процесі виконання роботи необхідно визначити:

- масову подачу матеріалу G , кг/с;
- активну ширину живильника B , м;
- тривалість перебування частинок у робочій зоні сепаратора τ , с;
- мінімально потрібну напруженість електричного поля $E_{\min}$, кВ/м;
- потрібну робочу напругу між електродами U , кВ;
- відхилення траєкторії насіння основної культури x_n , м;
- відхилення траєкторії домішок x_d , м;

- координату встановлення роздільної перегородки x_{sep} , м.

Перевірити умову працездатності сепаратора $E_{min} \leq E_{dop}$ та зробити висновок щодо можливості ефективного розділення суміші за заданих умов.

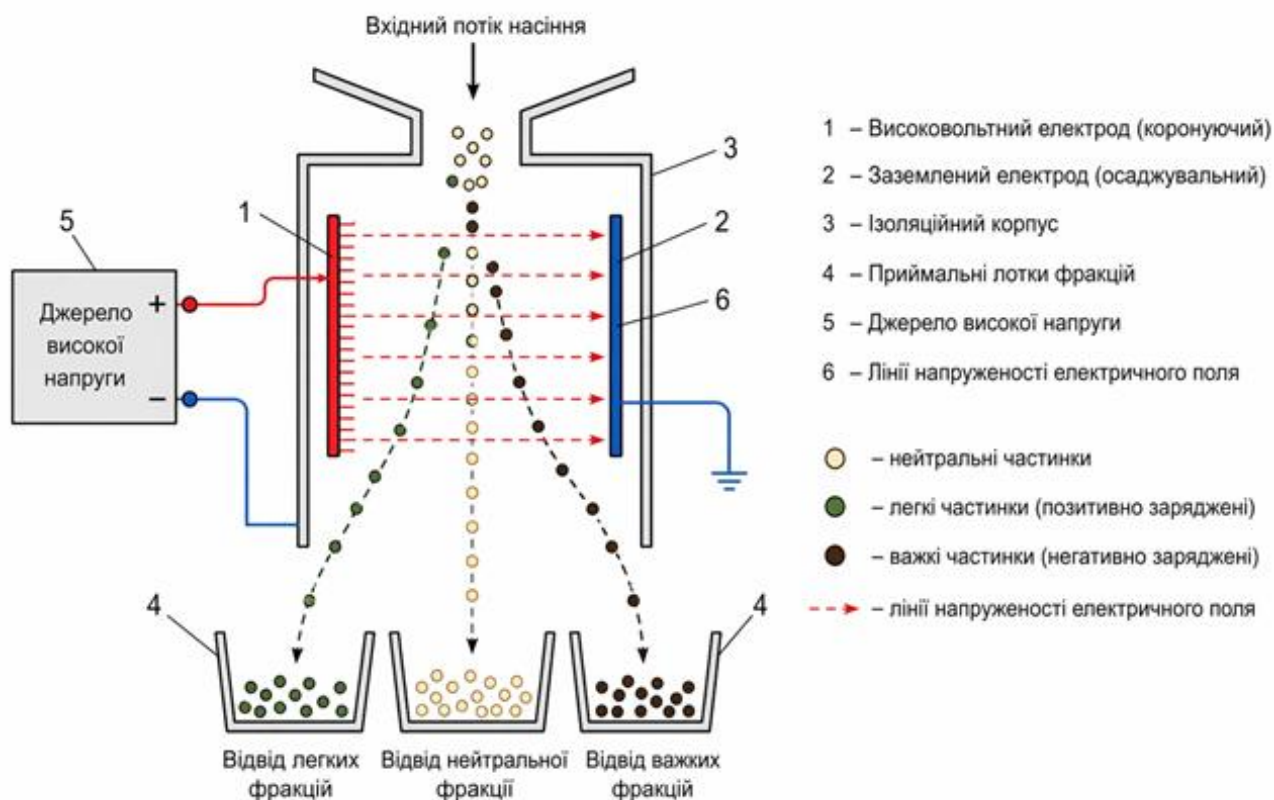


Рисунок 14.3 – Розрахункова схема камерного електростатичного сепаратора

Таблиця 14.1 – Вихідні дані до завдання

Варіант	Культура	Домішка / небажана фракція	Q , кг/год	H , м	δ , м	Δx_{min} , м	β_n , nC/g	β_d , nC/g	q_F , кг/(м ² ·с)	v_F , м/с	E_{dop} , кВ/м
1	Пшениця	Подрібнена солома	120	0,9	0,05	0,05	2,4	5,6	0,9	0,09	220
2	Ячмінь	Полова	140	0,9	0,06	0,05	2,2	5,4	1,0	0,10	220
3	Овес	Лузга	100	1,0	0,05	0,04	2,8	6,2	0,8	0,08	240
4	Жито	Щупле зерно	160	1,0	0,06	0,05	2,5	5,8	1,0	0,10	240
5	Просо	Плівки	90	0,8	0,05	0,04	2,0	4,8	0,8	0,08	200
6	Гречка	Оболонки	110	0,9	0,06	0,05	2,6	5,5	0,9	0,09	230
7	Ріпак	Стручкові домішки	130	1,0	0,05	0,05	3,0	6,8	1,0	0,09	260

Продовження табл. 14.1

Варіант	Культура	Домішка / небажана фракція	Q , $кг/год$	H , $м$	δ , $м$	$\Delta x_{\min}$, $м$	β_n , nC/g	β_d , nC/g	q_F , $кг/(м^2 \cdot c)$	v_F , $м/с$	E_{dop} , $кВ/м$
8	Соняшник	Лузга	180	1,1	0,07	0,06	2,7	6,5	1,2	0,10	260
9	Горох	Щуплі зерна	150	1,0	0,06	0,06	2,3	5,0	1,1	0,10	220
10	Соя	Оболонки	170	1,0	0,07	0,06	2,9	6,6	1,1	0,11	260
11	Пшениця	Насіння бур'янів	200	1,1	0,06	0,06	2,5	6,0	1,2	0,11	260
12	Ячмінь	Щупле зерно	220	1,1	0,07	0,06	2,4	5,7	1,2	0,12	240
13	Овес	Соломисті домішки	180	1,2	0,06	0,07	2,7	6,4	1,1	0,11	250
14	Жито	Полова	210	1,1	0,07	0,07	2,6	6,1	1,2	0,11	250
15	Просо	Щупле насіння	140	0,9	0,05	0,05	2,1	4,9	1,0	0,10	210
16	Гречка	Легкі оболонки	160	1,0	0,06	0,06	2,5	5,9	1,1	0,10	230
17	Ріпак	Квіткові домішки	190	1,1	0,05	0,06	3,2	7,2	1,2	0,10	280
18	Соняшник	Порожні сім'янки	240	1,2	0,07	0,07	2,8	6,7	1,3	0,12	260
19	Горох	Оболонки	260	1,2	0,08	0,08	2,4	5,8	1,3	0,12	240
20	Соя	Насіння бур'янів	280	1,2	0,08	0,08	3,0	7,0	1,4	0,12	280
21	Пшениця	Полова	320	1,2	0,07	0,08	2,6	6,2	1,4	0,13	250
22	Ячмінь	Легкі домішки	360	1,2	0,08	0,08	2,5	6,0	1,5	0,13	240

ПРИКЛАД

Розрахувати камерний електростатичний сепаратор для очищення пшениці від легких органічних домішок за таких вихідних даних:

$$Q = 180 \text{ кг} / \text{год}; H = 1,0 \text{ м}; \delta = 0,06 \text{ м}; \Delta x_{\min} = 0,06 \text{ м}; \beta_n = 2,5 \text{ нКл} / \text{г};$$

$$\beta_d = 6,0 \text{ нКл} / \text{г}; q_F = 1,1 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}); v_F = 0,10 \text{ м} / \text{с}; E_{dop} = 250 \text{ кВ} / \text{м}.$$

Розрахунок

Визначаємо масову подачу матеріалу

$$G = \frac{Q}{3600},$$

де G – масова подача, $кг/с$;

Q – продуктивність сепаратора, $кг/год$.

Тоді

$$G = \frac{180}{3600} = 0,05 кг / с .$$

Визначаємо активну ширину живильника

$$B = \frac{G}{q_F v_F},$$

де B – активна ширина живильника, $м$;

q_F – допустиме поверхнєве навантаження на живильник, $кг/(м^2 \cdot с)$;

v_F – швидкість подачі матеріалу, $м/с$.

Підставляємо значення

$$B = \frac{0,05}{1,1 \cdot 0,10} = 0,455 м .$$

Отже, активна ширина живильника повинна становити приблизно

$$B \approx 0,46 м .$$

Визначаємо час перебування частинок у робочій зоні

$$\tau = \sqrt{\frac{2H}{g}},$$

де τ – час польоту частинки, $с$;

H – висота робочої камери, $м$;

$g=9,81 м/с^2$ – прискорення вільного падіння,

$$\tau = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,0}{9,81}} = 0,451 с .$$

Переводимо питомі заряди в одиниці СІ

$$1 нКл / с = 10^{-6} Кл / кг .$$

Тоді для насіння пшениці

$$\beta_n = 2,5 \cdot 10^{-6} Кл / кг ,$$

а для домішок

$$\beta_d = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл / кг }.$$

Різниця питомих зарядів

$$\Delta\beta = \beta_d - \beta_n = 6 \cdot 10^{-6} - 2,5 \cdot 10^{-6} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл / кг }.$$

Визначаємо мінімально потрібну напруженість електричного поля

$$E_{\min} = \frac{x_{\min} g}{H \cdot |\beta_d - \beta_n|},$$

де $E_{\min}$ – мінімально потрібна напруженість поля, В/м;

$\Delta x_{\min}$ – мінімально потрібна різниця відхилень траєкторій, м.

Підставляємо значення:

$$E_{\min} = \frac{0,06 \cdot 9,81}{1,0 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6}} = 168171 \text{ В / м }.$$

Отже,

$$E_{\min} = 168,2 \text{ кВ / м }.$$

Визначаємо потрібну робочу напругу між електродами

$$U = E_{\min} \delta,$$

де U – робоча напруга, В;

δ – міжелектродний проміжок, м,

$$U = 168171 \cdot 0,06 = 10090 \text{ В }.$$

Отже, потрібна робоча напруга становить

$$U \approx 10,1 \text{ кВ }.$$

Перевіряємо умову допустимої напруженості поля

$$E_{\min} = 168,2 \text{ кВ / м } < E_{\text{доп}} = 250 \text{ кВ / м }.$$

Отже, задана конструкція сепаратора є працездатною, а потрібна напруженість поля не перевищує допустимого значення.

Визначаємо відхилення траєкторії насіння основної культури

$$x_n = \frac{\beta_n E_{\min} H}{g};$$

$$x_n = \frac{2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 168171 \cdot 1,0}{9,81} = 0,0429 \text{ м }.$$

Отже,

$$x_n \approx 0,043\text{ м} = 4,3\text{ см}.$$

Визначаємо відхилення траєкторії домішок

$$x_d = \frac{\beta_d E_{\min} H}{g};$$

$$x_d = \frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot 168171 \cdot 1,0}{9,81} = 0,1028\text{ м}.$$

Отже,

$$x_d \approx 0,103\text{ м} = 10,3\text{ см}.$$

Перевіряємо умову розділення

$$\Delta x = x_d - x_n = 0,1028 - 0,0429\text{ м} = 0,0599\text{ м};$$

$$\Delta x \approx 0,06\text{ м} = 6\text{ см}.$$

Отже, потрібна умова розділення виконується.

Визначаємо координату встановлення роздільної перегородки

$$x_{sep} = \frac{x_n + x_d}{2};$$

$$x_{sep} = \frac{0,0429 + 0,1028}{2} = 0,0729\text{ м}.$$

Отже, перегородку доцільно встановити на відстані приблизно

$$x_{sep} = 0,073\text{ м} = 7,3\text{ см}$$

від осі симетрії робочої зони в бік відхилення частинок.

Висновок. У результаті розрахунку встановлено, що для очищення пшениці від легких органічних домішок за продуктивності 180 кг/год потрібна активна ширина живильника приблизно 0,46 м. За висоти робочої камери 1,0 м і міжелектродного проміжку 0,06 м мінімально потрібна напруженість електричного поля становить 168,2 кВ/м, а робоча напруга між електродами – близько 10,1 кВ. Відхилення траєкторії насіння пшениці становить 4,3 см, а домішок – 10,3 см, тому різниця відхилень забезпечує потрібне розділення. Роздільну перегородку доцільно встановити на відстані 7,3 см від осі симетрії робочої зони.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає фізична суть електростатичної сепарації насіннєвого матеріалу?
2. Які електрофізичні властивості частинок найбільше впливають на процес електростатичного розділення?
3. Які основні типи електросепараторів застосовують у сільському господарстві?
4. Чому для сепарації насіння часто використовують поле негативного уніполярного коронного розряду?
5. Який фізичний зміст має питомий заряд частинки q/m ?
6. За якою умовою визначають мінімально потрібну напруженість електричного поля в сепараторі?
7. Як впливає висота робочої камери на якість розділення фракцій?
8. Який зв'язок існує між міжелектродним проміжком і робочою напругою сепаратора?
9. Для чого в розрахунку визначають активну ширину живильника?
10. Які конструктивні або режимні параметри можна змінити, якщо потрібна напруженість електричного поля перевищує допустиме значення?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Котов, Б. І., Грищенко, В. О., Калініченко, Р. А., Панцир, Ю. І., & Герасимчук, І. Д. (2025). Електротехнологічні процеси і установки в АПК: основи функціонування та моделювання динамічних режимів: монографія. НУБіП України, 377 с.
2. Шебанін, В. С. (Ред.), Бацуровська, І. В., Гавриш, В. І., & Грубань, В. А. (2022). Електротехнології в АПК: навчальний посібник. Миколаївський національний аграрний університет, 326 с.
3. Матвійчук, В. А., Рубаненко, О. Є., & Стаднійчук, І. П. (2020). Електротехнології в АПК: навчальний посібник. ТОВ «ТВОРИ», 272 с.
4. Руденко, А. Ю., Мардзявко, В. А., & Чурило, Р. Є. (2024). Електрофізичні методи обробки сільськогосподарської продукції: методичні рекомендації. Миколаївський національний аграрний університет, 56 с.
5. Шутюк, В. В., Бессараб, О. С., Душак, О. В., & Ємцев, В. І. (2022). Холодильні технології: навчальний посібник. НУХТ; ФОП Ямчинський О. В., 172 с.
6. Семенюк, Д. П., & Петренко, О. В. (2021). Холодильне обладнання: підручник. Світ Книг, 633 с.
7. Усенко, С. М. (2023). Електротехнології в АПК: навчальний посібник. НУБіП України, 296 с.
8. Kumar, N., Panghal, A., & Garg, M. K. (2022). Thermal food engineering operations. Wiley, 496 pp.
9. Jameel, F. (Ed.). (2023). Principles and practices of lyophilization in product development and manufacturing. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-12634-5>
10. Kaushik, S. C., Tyagi, S. K., & Baiju, V. (2024). Solar cooling: Basics and advances. Springer, 357 pp.
11. Chelgani, S. C., & Neisiani, A. A. (2022). Dry mineral processing. Springer, 156 pp.
12. Kunar, S., & Mandal, G. (Eds.). (2025). Advanced welding technologies. Wiley, 608 pp.

13. Bjerg, B. (2023). Modelling and design of the microclimate in livestock housing. In Q. Zhang (Ed.), *Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies*. Springer, pp. 854–868.
14. Lupi, S. (2017). *Fundamentals of electroheat: Electrical technologies for process heating*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46015-4>.

ДОДАТКИ

Додаток А – ТАБЛИЧНІ ДАНІ ТА РОЗРАХУНКОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН

Таблиця А.1 – Фізичні властивості сухого повітря за нормальних умов
(тиск 760 мм рт.ст.)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$	$\mu \cdot 10^6, \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	11,79	0,716
-10	1,342	1,005	2,36	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,009	2,90	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	53,5	233,7	0,724

Таблиця А.2 – Фізичні властивості води на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho,$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$c_p,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2,$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\mu \cdot 10^6,$ $\text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4,$ К^{-1}	Pr
0	1,013	999,9	4,212	55,1	1788	1,789	-0,63	13,67
10	1,013	999,7	4,191	57,4	1306	1,306	0,7	9,52
20	1,013	998,2	4,183	59,9	1004	1,006	1,82	7,02
30	1,013	995,2	4,174	61,8	801,5	0,805	3,21	5,42
40	1,013	992,2	4,174	63,5	653,3	0,659	3,87	4,31
50	1,013	988,1	4,174	64,8	549,4	0,556	4,49	3,54
60	1,013	983,2	4,179	65,9	469,4	0,478	5,11	2,98
70	1,013	977,8	4,187	66,8	406,1	0,415	5,70	2,55
80	1,013	971,8	4,195	67,4	355,1	0,365	6,32	2,21
90	1,013	965,3	4,208	68,0	314,9	0,326	6,95	1,95
100	1,013	958,4	4,220	68,3	282,5	0,295	7,52	1,75
110	1,43	951,0	4,233	68,5	259,0	0,272	8,08	1,60
120	1,98	943,1	4,250	68,6	237,4	0,252	8,64	1,47
130	2,70	934,8	4,266	68,6	217,8	0,233	9,19	1,36
140	3,61	926,1	4,287	68,5	201,1	0,217	9,72	1,26
150	4,76	917,0	4,313	68,4	186,4	0,203	10,3	1,17
160	6,18	907,4	4,346	68,3	173,6	0,191	10,7	1,10
170	7,92	897,3	4,380	67,9	162,8	0,181	11,3	1,05
180	10,03	886,9	4,417	67,4	153,0	0,173	11,9	1,00
190	12,55	876,0	4,459	67,0	144,2	0,165	12,6	0,96
200	15,55	863,0	4,505	66,3	136,4	0,158	13,3	0,93
210	19,08	852,8	4,555	65,5	130,5	0,153	14,1	0,91
220	23,20	840,3	4,614	64,5	124,6	0,148	14,8	0,89
230	27,98	827,3	4,681	63,7	119,7	0,145	15,9	0,88
240	33,48	813,6	4,756	62,8	114,8	0,141	16,8	0,87
250	39,78	799,0	4,844	61,8	109,9	0,137	18,1	0,86
260	46,94	784,0	4,949	60,5	105,9	0,135	19,7	0,87
270	55,05	767,9	5,070	59,0	102,0	0,133	21,6	0,88
280	64,19	750,7	5,230	57,4	98,1	0,131	23,7	0,90
290	74,45	732,3	5,485	55,8	94,2	0,129	26,2	0,93
300	85,92	712,5	5,736	54,0	91,2	0,128	29,2	0,97
310	98,70	691,1	6,071	52,3	88,3	0,128	32,9	1,03
320	112,90	667,1	6,574	50,6	85,3	0,128	38,2	1,11
330	128,65	640,2	7,244	48,4	81,4	0,127	43,3	1,22
340	146,08	610,1	8,165	45,7	77,5	0,127	53,4	1,39
350	165,37	574,4	9,504	43,0	72,6	0,126	66,8	1,60
360	186,74	528,0	13,984	39,5	66,7	0,126	109,0	2,35
370	210,53	450,5	40,321	33,7	56,9	0,126	264,0	6,79

Таблиця А.3 – Розрахункові рівняння для вологого повітря

Величина	Позначення	Формула	Розмірність	Застосування
Вологовміст	d	$d = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{B - \varphi \cdot p_s}$	$\frac{\text{кг.вол}}{\text{кг.с.п.}}$	—
Барометричний тиск	B	—	Па	$B = 100 \text{ кПа}$
Тиск насиченої водяної пари	p_s	$p_s = 0,5717 \exp(0,0805 \cdot t)$ $p_s = 0,8 \exp(0,053623 \cdot t)$ $p_s = 243,115 + 6,5595 \cdot t$	кПа кПа Па	$-20,3^\circ\text{C} \leq t \leq 12^\circ\text{C}$ $10^\circ\text{C} \leq t \leq 70^\circ\text{C}$ $-30^\circ\text{C} \leq t \leq -20^\circ\text{C}$
Відносна вологість	φ	$\varphi = \frac{B \cdot d}{p_s \cdot (0,622 + d)}$	—	—
Питома ентальпія	h	$h = (1,01 + 1,97 \cdot d) \cdot t + 2493 \cdot d$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг с.п.}}$	—
Густина вологого повітря	$\rho_{в.п.}$	$\rho_{в.п.} = \left(1 - 0,378 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{B}\right) \cdot \frac{B}{R_{с.п.} \cdot T}$ $\rho_{в.п.} = (1 + d) \cdot \frac{B - \varphi \cdot p_s}{R_{с.п.} \cdot T}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	—
Ізобарна теплоємність вологого повітря	$c_{в.п.}$	$c_{в.п.} = 1,006 + 1,87 \cdot d$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	—
Питомий об'єм по сухому повітрю	$\bar{v}$	$\bar{v} = \frac{\dot{V}_{в.п.}}{\dot{m}_{с.п.}}$ $\bar{v} = \frac{R_{с.п.} \cdot T}{B - \varphi \cdot p_s}$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}_{с.п.}}$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}_{с.п.}}$	—
Масова витрата сухого повітря	$\dot{m}_{с.п.}$	$\dot{m}_{с.п.} = \frac{\dot{m}_{в.п.}}{1 + d}$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	—
Зміна Δh по лінії $\varepsilon_n = \text{const}$	Δh_ε	$\Delta h = c_{в.п.} \cdot \Delta t_{нагб} \cdot \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_n - r}$ $h_B = h_{II} - c_{в.п.} \cdot \Delta t_{нагб} \cdot \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_n - r}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг с.п.}}$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг с.п.}}$	$r = 2501 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ $\Delta t_{нагб} = t_{II} - t_B$
Зміна Δd по лінії $\varepsilon_n = \text{const}$	Δd_ε	$\Delta d = \frac{c_{в.п.} \cdot \Delta t_{нагб}}{\varepsilon_n - r}$ $d_B = d_{II} - \frac{c_{в.п.} \cdot \Delta t_{нагб}}{\varepsilon_n - r}$	$\frac{\text{кг.вол}}{\text{кг.с.п.}}$ $\frac{\text{кг.вол}}{\text{кг.с.п.}}$	$r = 2501 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ $\Delta t_{нагб} = t_{II} - t_B$
Зведена продуктивність вентилятора	$\dot{V}_H$	$\dot{V}_H = \dot{V} \cdot \frac{P_H}{P} \cdot \frac{T}{T_H}$	$\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$P_H = 100 \text{ кПа}$ $T_H = 273 \text{ К}$

Додаток Б – ДІАГРАМИ

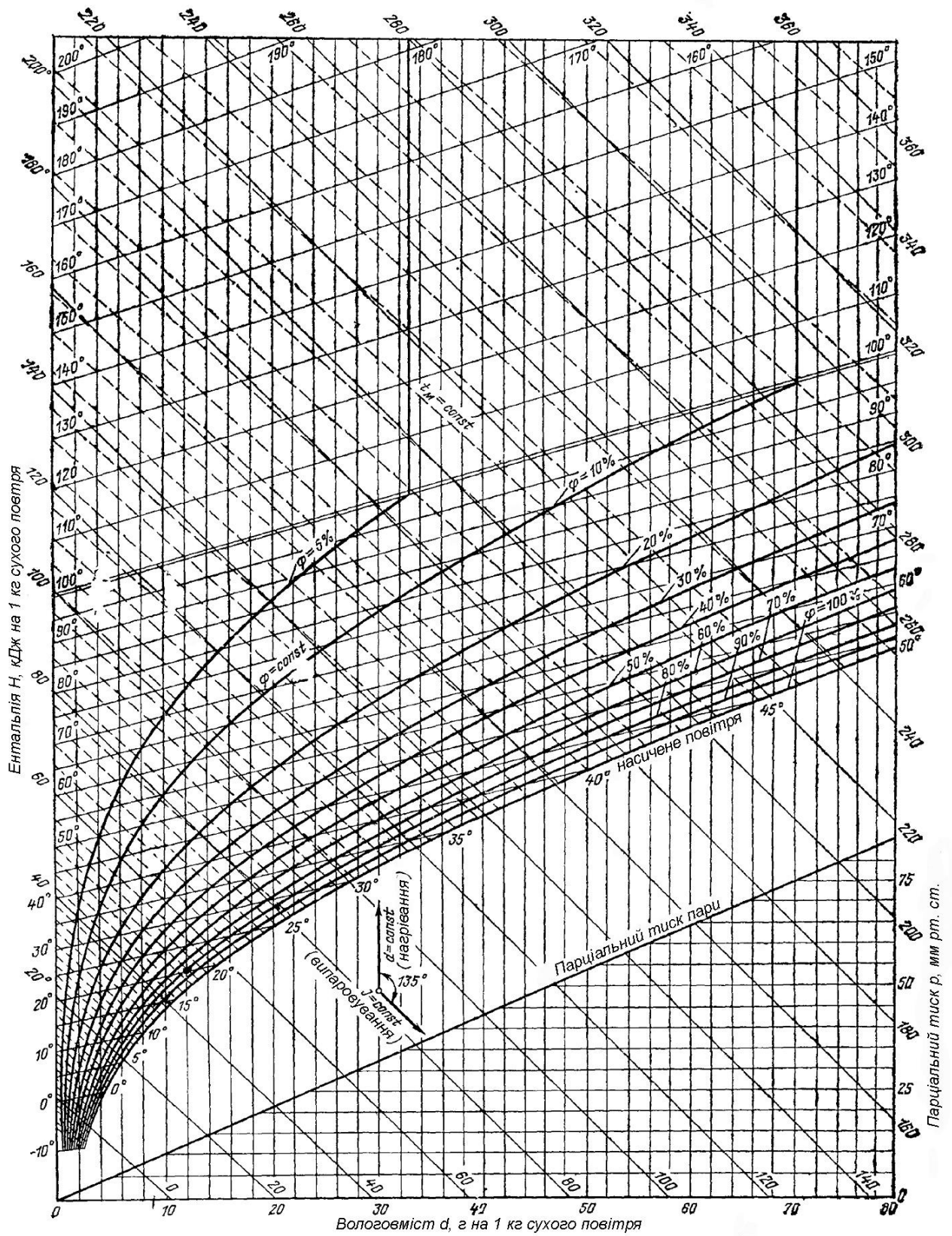


Рисунок Б.1 – $H - d$ діаграма вологого повітря при тиску 745 мм рт. ст.

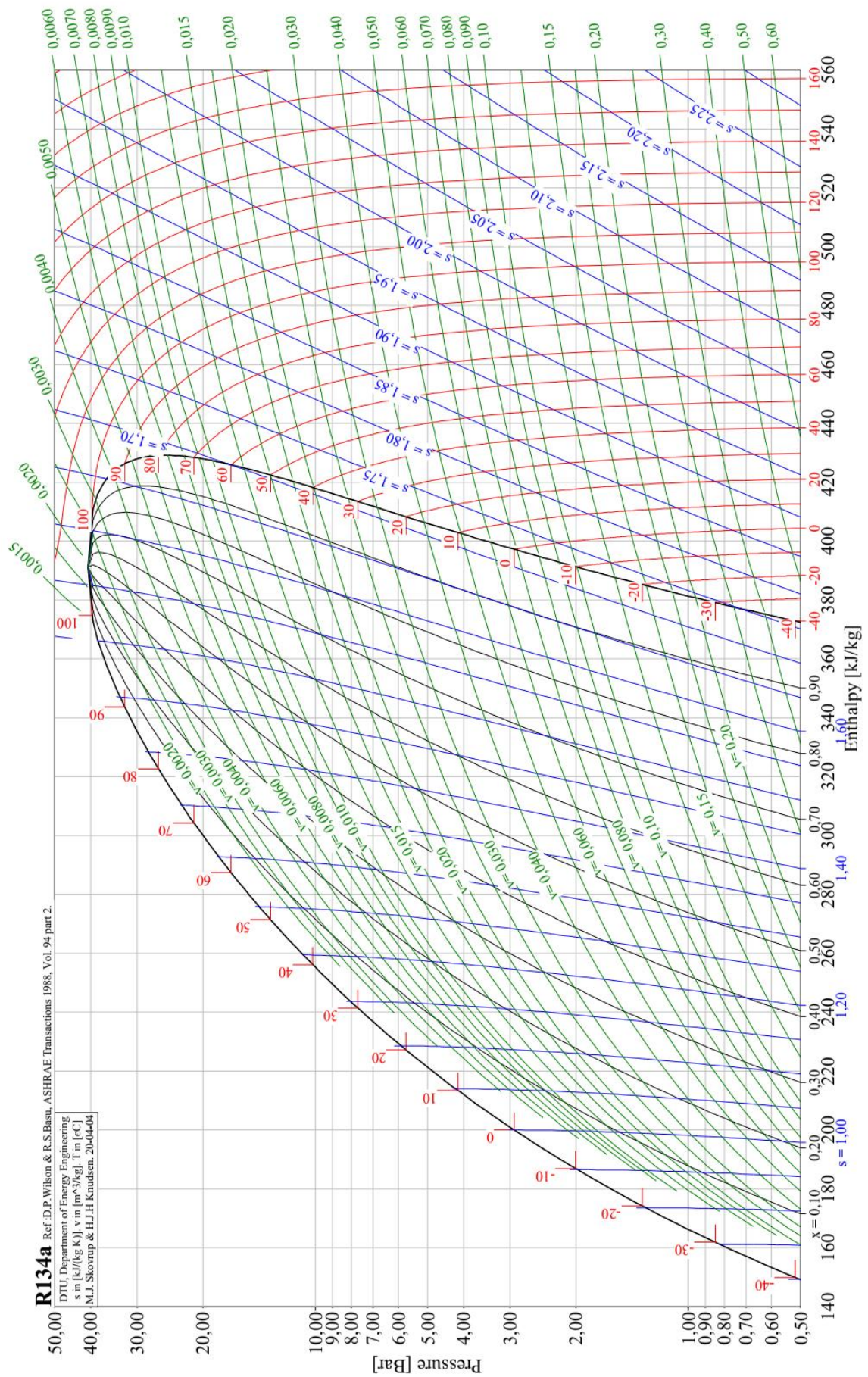


Рисунок Б.2 – $p-h$ діаграма для R134a

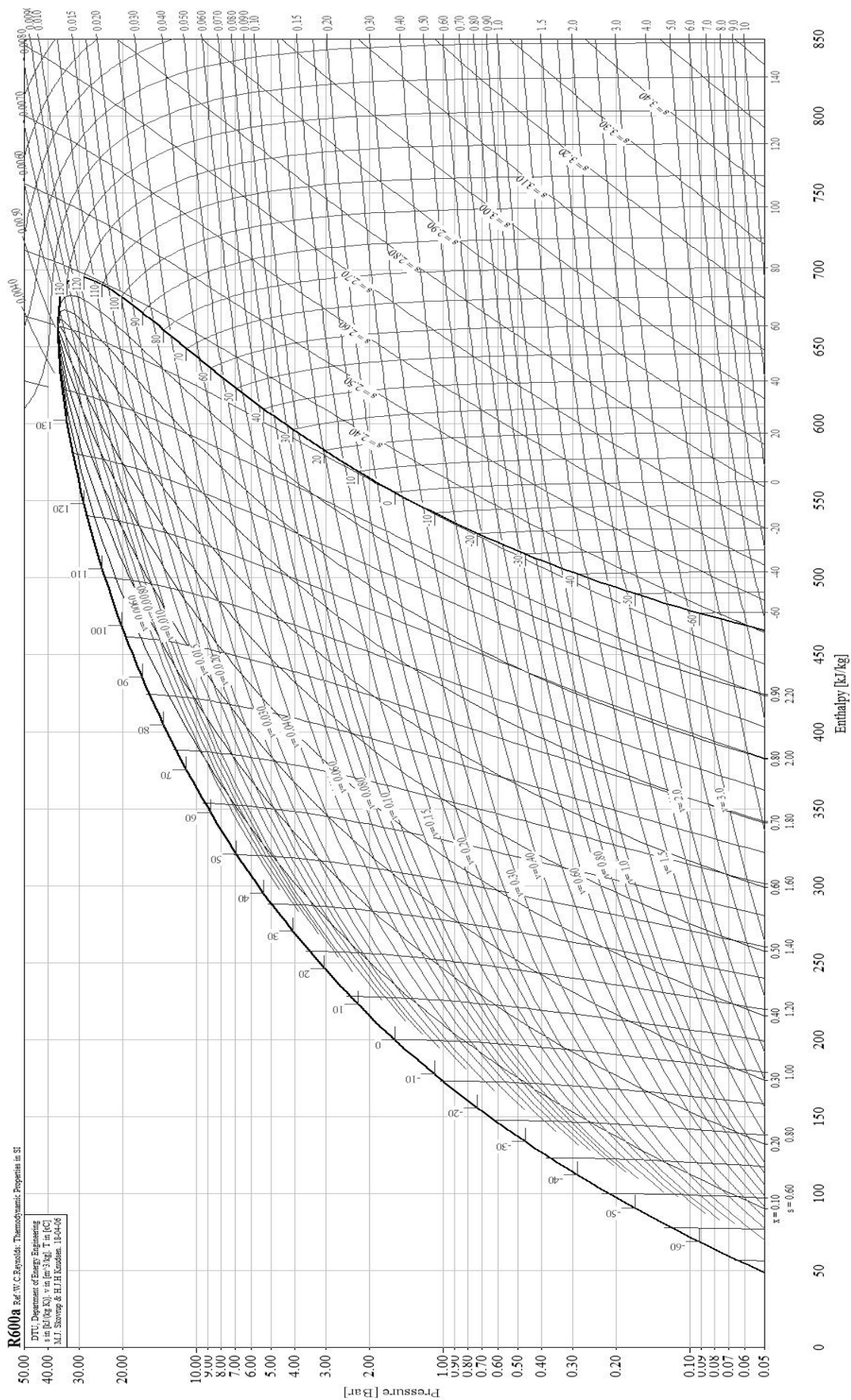


Рисунок Б.4 – $p-h$ діаграма для R600a

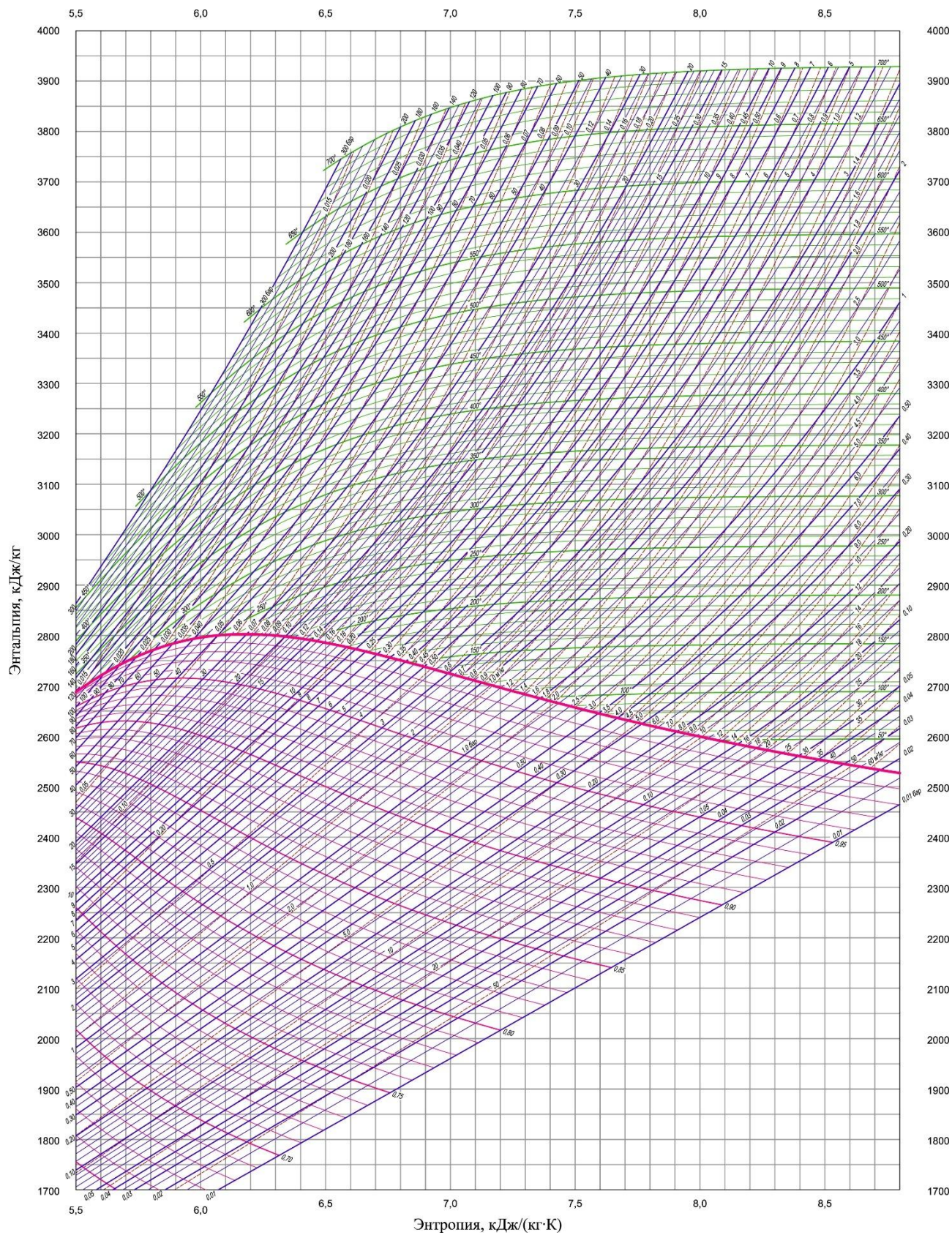


Рисунок Б.5 – $h-s$ діаграма водяної пари

Додаток В – ТЕПЛО-, ВОЛОГО- І ГАЗОВИДІЛЕННЯ ТВАРИН І ПТАХІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ *

Таблиця В.1 – Курі (бройлери) (розрахункова температура приміщення 18 °С)

Жива маса, <i>кг/гол</i>	Явна теплота <i>q_s, Вт/гол</i>	Волога w, <i>г/(год·гол)</i>	CO ₂ , <i>л/(год·гол)</i>	NH ₃ , <i>мг/(год·гол)</i>
0,05	0,32	0,85	0,21	1,5
0,10	0,53	1,44	0,35	2,5
0,20	0,90	2,42	0,59	4,5
0,30	1,22	3,27	0,80	7,0
1,5	4,8	6,0	1,7	12
1,8	5,4	6,8	1,9	15
2,1	5,9	7,6	2,2	18
2,4	6,4	8,4	2,5	22

Таблиця В.2 – Свині на відгодівлі (розрахункова температура приміщення 18 °С)

Жива маса, <i>кг/гол</i>	Явна теплота <i>q_s, Вт/гол</i>	Волога w, <i>г/год·гол</i>	CO ₂ , <i>л/(год·гол)</i>	NH ₃ , <i>мг/(год·гол)</i>
20	61,8	56,6	18,1	80
40	97,2	89,0	28,5	120
60	122,5	112,3	35,9	170
80	140,7	128,9	41,3	220

Таблиця В.3 – Корови дійні (розрахункова температура приміщення 10 °С)

Жива маса, <i>кг/гол</i>	Явна теплота <i>q_s, Вт/гол</i>	Волога w, <i>г/(год·гол)</i>	CO ₂ , <i>л/(год·гол)</i>	NH ₃ , <i>мг/(год·гол)</i>
450	18	657,9	474,9	174,5
550	22	781,3	564,0	207,2
650	28	932,6	673,2	247,3
750	34	1081,7	780,8	286,9

Таблиця В.4 – Коні (розрахункова температура приміщення 10 °С)

Жива маса, <i>кг/гол</i>	Явна теплота <i>q_s, Вт/гол</i>	Волога w, <i>г/(год·гол)</i>	CO ₂ , <i>л/(год·гол)</i>	NH ₃ , <i>мг/(год·гол)</i>
350	423,5	132,1	91,3	60
450	511,4	159,5	110,3	80
550	594,4	185,4	128,2	100
650	673,8	210,2	145,3	120

Таблиця В.5 – Вівці (розрахункова температура приміщення 12 °С)

Жива маса, <i>кг/гол</i>	Явна теплота <i>q_s, Вт/гол</i>	Волога w, <i>г/(год·гол)</i>	CO ₂ , <i>л/(год·гол)</i>	NH ₃ , <i>мг/(год·гол)</i>
50	1,0	126,1	44,7	28,4
60	1,2	146,0	51,8	32,9
70	1,4	165,3	58,7	37,2
80	1,5	181,4	64,4	40,8

* Усі довідкові дані наведені для стану спокою або повільного переміщення

Додаток В – ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Таблиця В.1 – Основні характеристики матеріалів заготовок

Матеріал	Густина , $\text{кг}/\text{м}^3$	Тепло- єм- ність c , $\text{Дж}/$ $(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\rho_{20} \times 10^7$, $\text{Ом} \cdot \text{м}$	$\rho(t), \text{Ом} \cdot \text{м}$
Сталі 20, 35, 45, 50	7850	480	1,7	$1,7 \cdot 10^{-7} \left[1 + 3,8 \cdot 10^{-3}(t - 20) \right]$
Сталі 20Х, 40Х	7850	473	2,2	$2,2 \cdot 10^{-7} \left[1 + 3,65 \cdot 10^{-3}(t - 20) \right]$
Сталі 65Г, У8А, У10А	7850	465	2,0	$2 \cdot 10^{-7} \left[1 + 3,65 \cdot 10^{-3}(t - 20) \right]$
ШХ15	7810	475	2,19	$2,19 \cdot 10^{-7} \left[1 + 3,5 \cdot 10^{-3}(t - 20) \right]$
12Х18Н10Т	8000	500	7,2	$7,2 \cdot 10^{-7} \left[1 + 0,97 \cdot 10^{-3}(t - 20) \right]$
Мідь Cu- ЕТР	8940	385	0,17	$0,17 \cdot 10^{-7} \left[1 + 3,9 \cdot 10^{-3}(t - 20) \right]$
Алюмінієви й сплав 6061	2700	896	0,399	$0,399 \cdot 10^{-7} \left[1 + 3,8 \cdot 10^{-3}(t - 20) \right]$
Латунь Л63	8530	375	0,71	$0,71 \cdot 10^{-7} \left[1 + 1,5 \cdot 10^{-3}(t - 20) \right]$

Додаток Г – КОНДЕНСАТОРИ

Таблиця Г.1 – Характеристики конденсаторів

Марка конденсатора	Номінальна напруга, <i>V</i>	Номінальна реактивна потужність, <i>кВАр</i>	Ємність, <i>мкФ</i>
КС-0.38-50	380	50	—
КС-0.5-19	500	19	—
КС-0.5-36	500	36	—
КС-0.66-50	660	50	—
КСЕ-1.05-75	1050	75	—
КСЕК-1.2-150	1200	150	—
ЕСВ-0.8-0.5	800	200	99,5
ЕСВ-1.0-0.5	1000	200	63,6
ЕСВ-1.6-0.5	1600	200	24,9
ЕСВ-2-0.5	2000	200	15,9
ЕСВ-0.8-1	800	250	62,2
ЕСВ-1-1	1000	250	39,8
ЕСВ-1.6-1	1600	250	15,5
ЕСВ-2-1	2000	250	9,9
ЕСВ-0.5-2.4	500	300	79,6
ЕСВП-0.8-2.4	800	300	31,2
ЕСВ-1.6-2.4	1600	300	7,8
ЕСВ-1-2.4	1000	300	19,9
ЕСВП-1-2.4	1000	300	19,9
ЕСВ-2-2.4	2000	300	4,9
ЕСВ-0.5-4	500	350	55,7
ЕСВ-0.8-4	800	350	21,8
ЕСВП-0.8-4	800	350	21,8
ЕСВ-1-4	1000	350	13,9
ЕСВП-1-4	1000	350	13,9
ЕСВ-1.6-4	1600	350	5,4
ЕСВ-2-4	2000	350	3,5
ЕСВ-0.5-10	500	400	25,5
ЕСВ-0.8-10	800	400	9,9
ЕСВП-0.8-10	800	400	9,9

Додаток Д – ЕЛЕКТРОКАЛОРИФЕРИ

Таблиця Д.1 – Прямокутні каналні електрокалорифери Salda серії EKS, RB, VEAB серії VFL, VTL, VRA

Модель / серія	Переріз, <i>мм</i>	Номінальна потужність, <i>кВт</i>	Розрахункова мінімальна витрата при 1,5 м/с, <i>м³/год</i>
RB 40-20/15-1 або аналог EKS 400×200/15	400×200	15	432
RB 50-25/22-2 або аналог EKS 500×250/21–24	500×250	22	675
RB 50-30/27-2 або аналог EKS 500×300/27	500×300	27	810
RB 60-35/39-3 або аналог EKS 600×350/39	600×350	39	1134
RB 60-35/45-3 або аналог EKS 600×350/45	600×350	45	1134
RB 80-50/68-4 або аналог EKS 800×500/66	800×500	68	2160
RB 100-50/80-5	1000×500	80	2700
VEAB VFL / VTL / VRA, custom	1000×500	82–100	2700

Додаток Е – ВІДЦЕНТРОВІ ВЕНТИЛЯТОРИ

Таблиця Е.1 – Характеристики відцентрових вентиляторів

Модель вентилятора	Рекомендований електродвигун	Робочий діапазон подачі, $\text{м}^3/\text{год}$	Робочий діапазон тиску, Па
ВЦ 6-28 №4, мод.1, $D/D_n = 1,1$	4,0 кВт / 3000 об/хв	770–3300	3316–1346
ВЦ 6-28 №6.3, мод.1, $D/D_n = 1,1$	4,0 кВт / 1500 об/хв	1520–4750	2123–1760
ВЦ 6-28 №8, мод.1, $D/D_n = 1,0$	15,0 кВт / 1500 об/хв	1230–12170	2987–1183
Альтернатива для середньої групи: ВЦ 6-28 №6.3, мод. 5	7,5 кВт / 1500 об/хв	740–7330	2816–1115

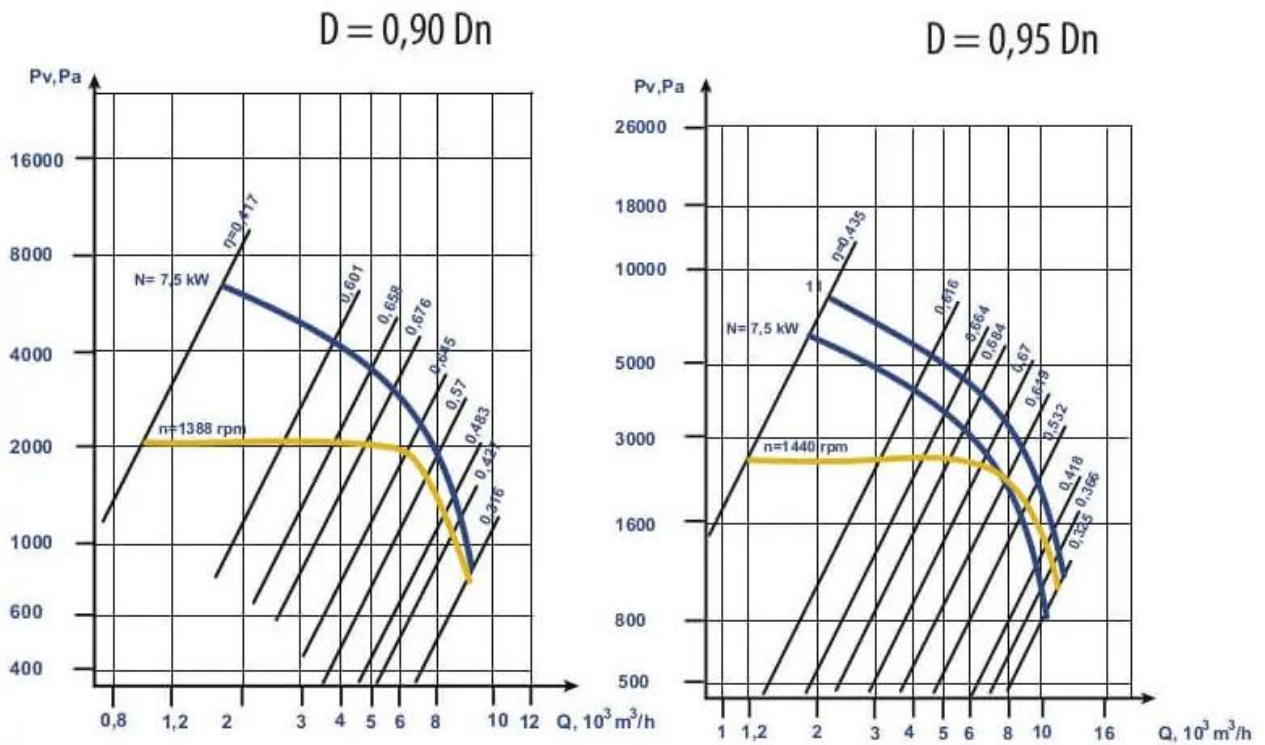
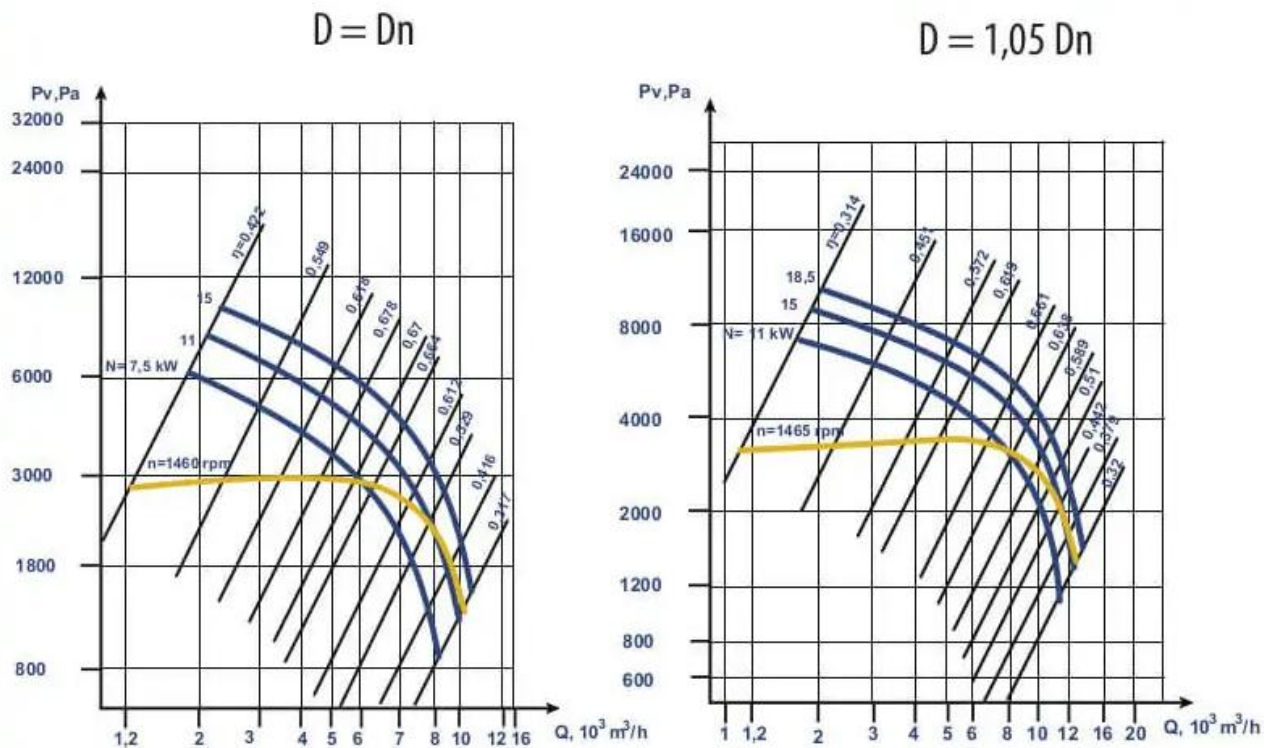


Рисунок Е.1 – Аеродинамічні характеристики вентилятора ВЦ 6-28 (VR 120-28) № 8 при нормальних технічних умовах (760 мм. рт. ст.; 20 °C)



Q - air productivity, thousand m^3/h

P_v - total pressure

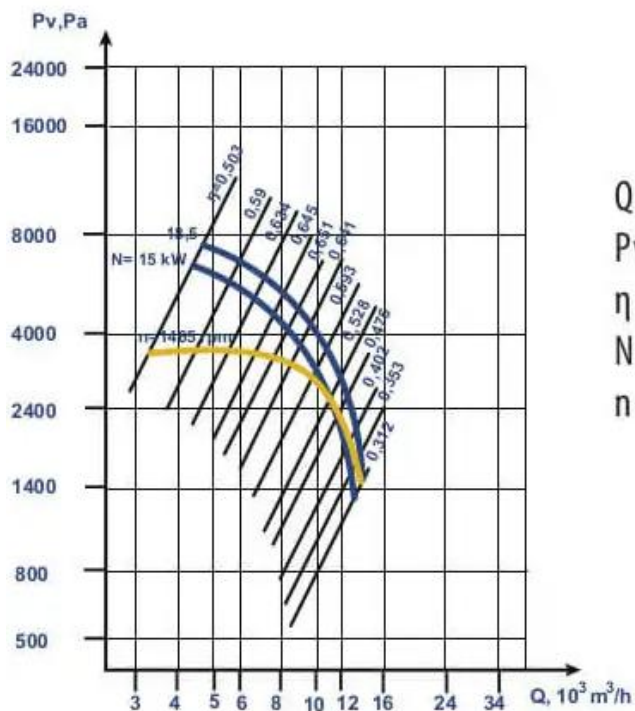
η - coefficient of efficiency

n - quantity of rotations on the impeller, rpm

N - power consumption of the engine, kW

U - wheel peripheral speed, m / s

$D = 1,1 D_n$



Q - air capacity, thousand m^3/h

P_v - total pressure, Pa

η - efficiency factor

N - power consumption of the engine, kW

n - quantity of rotation of the impeller, rpm

Рисунок Е.1. Продолжения

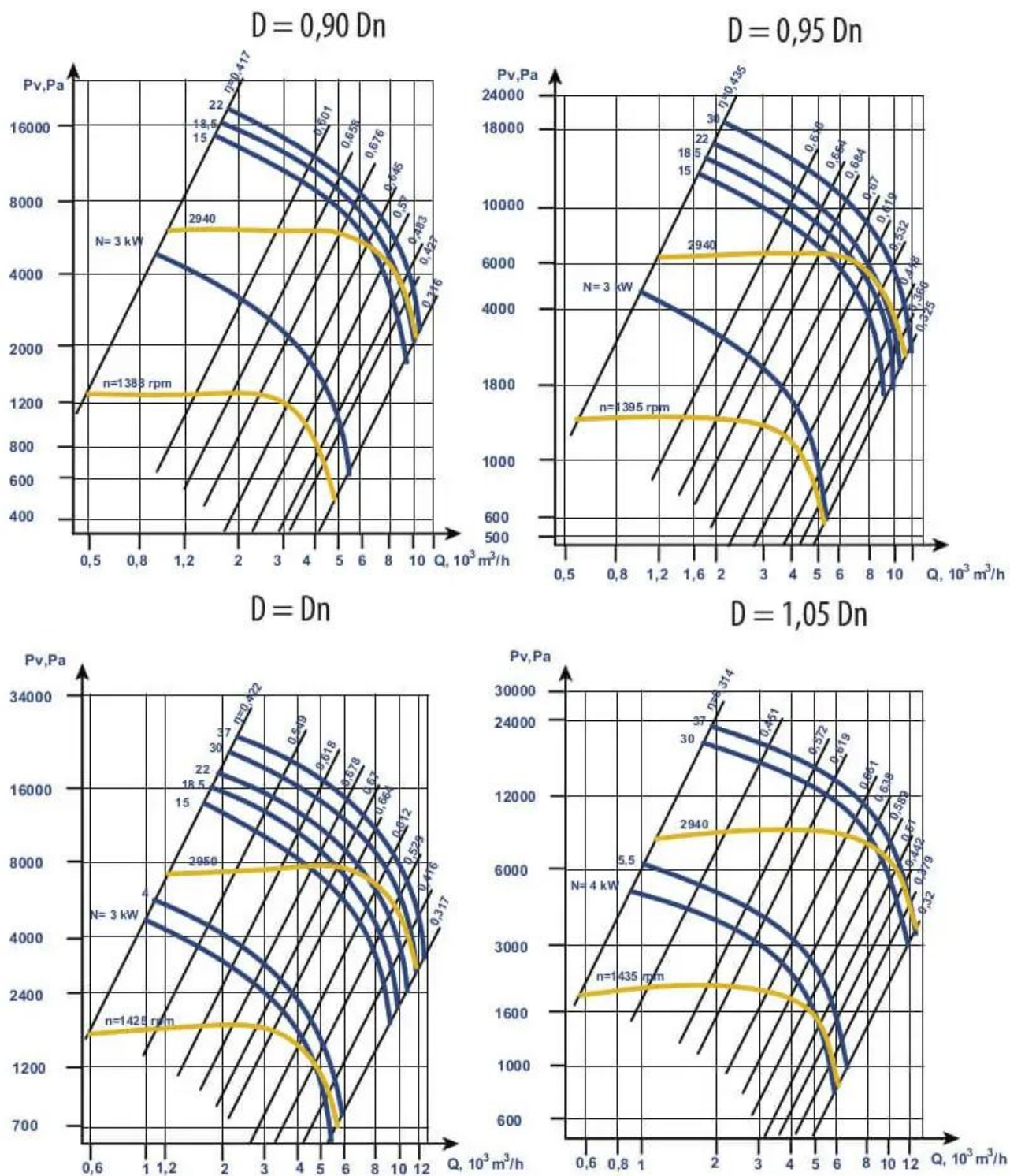
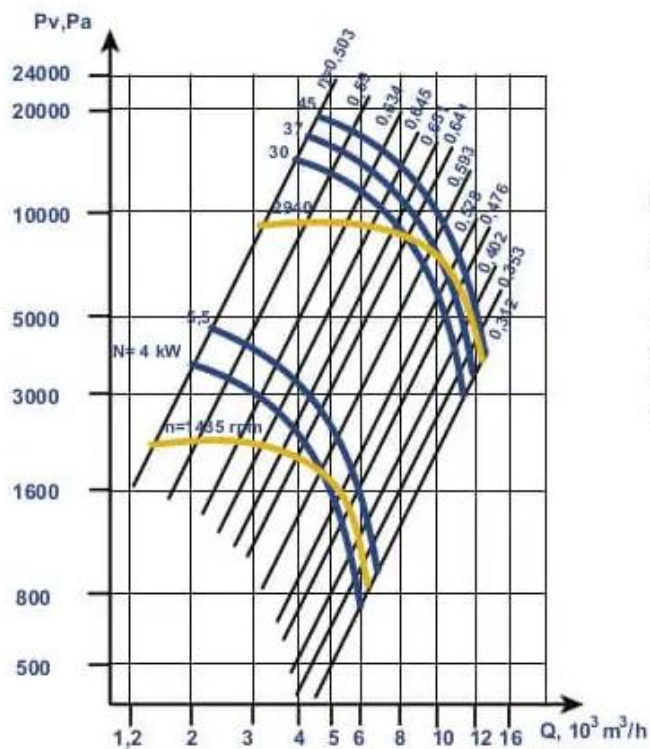


Рисунок Е.2 – Аеродинамічні характеристики вентилятора ВЦ 6-28 (VR 120-28) № 6,3 при нормальних технічних умовах (760 мм. рт. ст.; 20 °С)

$$D = 1,1 D_n$$



Q - air capacity, thousand m³/h

Pv - total pressure, Pa

η - efficiency factor

N - power consumption of the engine, kW

n - quantity of rotation of the impeller, rpm

Q - air productivity, thousand m³/h

Pv - total pressure

η - coefficient of efficiency

n - quantity of rotations on the impeller, rpm

N - power consumption of the engine, kW

U - wheel peripheral speed, m / s

Рисунок Е.2. Продолжения

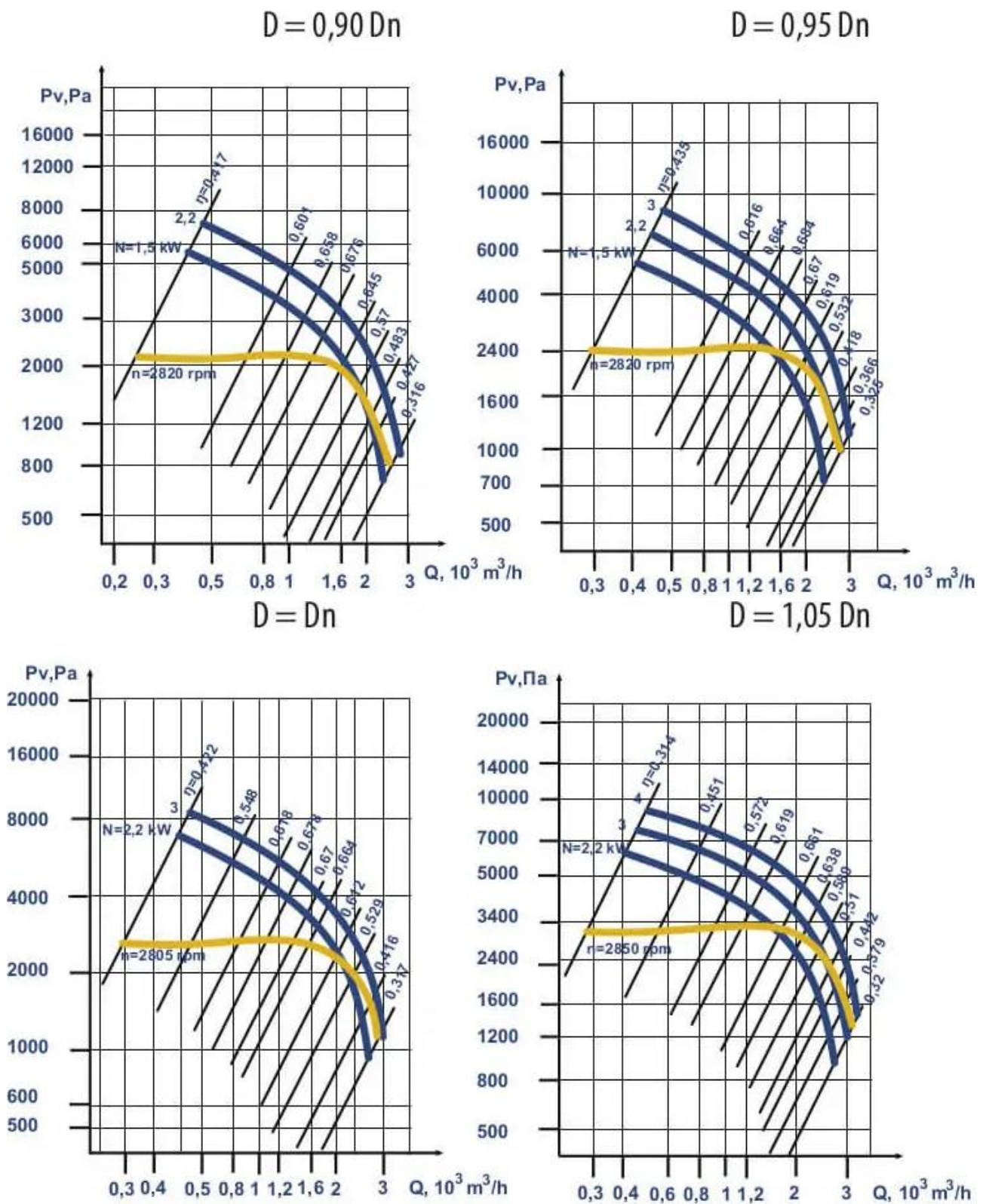
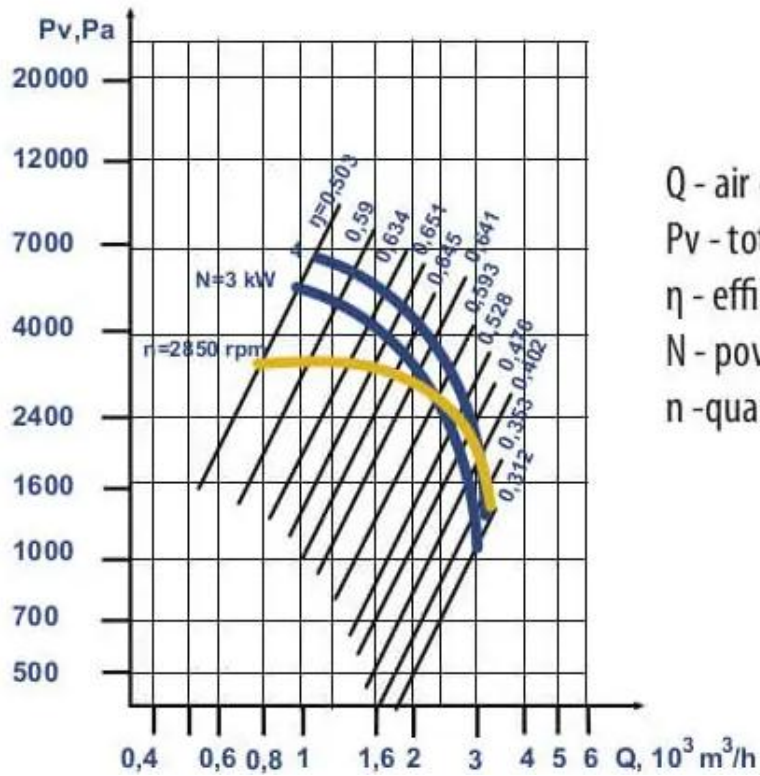


Рисунок Е.3 – Аеродинамічні характеристики вентилятора ВЦ 6-28 (VR 120-28) № 4 при нормальних технічних умовах (760 мм. рт. ст.; 20 °С)

$$D = 1,1 D_n$$



Q - air capacity, thousand m³/h

Pv - total pressure, Pa

η - efficiency factor

N - power consumption of the engine, kW

n - quantity of rotation of the impeller, rpm

Q - air productivity, thousand m³/h

Pv - total pressure

η - coefficient of efficiency

n - quantity of rotations on the impeller, rpm

N - power consumption of the engine, kW

U - wheel peripheral speed, m / s

Рисунок Е.3. Продовження

Додаток Є – ЕЛЕКТРОДВИГУНИ

Таблиця Є.1 – Основні характеристики асинхронних електродвигунів

Марка	Номінальна потужність, <i>кВт</i>	Номінальна / Реальна частота обертання, <i>об/хв</i>	ККД, %	Примітка
AIP 112M2	4,0	3000 / 2910	88,1	2-полісний
AIP 112M4	4,0	1500 / 1447–1450	88,6–91,1	4-полісний
AIP 132M4	7,5	1500 / 1460–1470	90.4–92.6	4-полісний
AIP 160L4	15,0	1500 / 1466–1475	92,1–93,9	4-полісний

Додаток Ж – ЗВАРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

Таблиця Ж.1 – Характеристики зварювальних трансформаторів

Модель	Напруга живл., <i>B</i>	Ном. звар. струм, <i>A</i>	Ном. робоча напруга, <i>B</i>	<i>TH</i> , %	Межі регул. струму, <i>A</i>	Напруга х.х., <i>B</i>	Споживана потужність, <i>кВА</i>	Маса, <i>кг</i>
ТДМ-161У2	230	160	26	20	50–160	40–50	8,8	24
ТДМ-252У2	230/400	250	30	40	50–250	40–50	15,4	40
ТДМ-303У2	230/400	315	33	60	60–315	50–60	19,0	63
ТДМ-403У2	230/400	400	36	60	80–400	60–70	28,6	85
ТДМ-503У2	400	500	40	60	100–500	60–70	34,2	95
ТДМ-602У2	400	600	44	60	120–600	70–80	45,6	150
ТДМ-250	230/400	250	30	10	59–250	до 70	18,0	48
ТДМ-315	400	155 / 315	26 / 32	60 / 10	70–180 / 180–325	67 / 75	13 / 24,5	53
ТДМ-161У2	230	160	26	20	50–160	40–50	8,8	24

Додаток К – ЕЛЕКТРОВОДОНАГРІВАЧІ СЕРІЇ УАП ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ НАГРІВАЧІ

Таблиця К.1 – Електроводонагрівачі серії УАП

Марка водо- нагрівача	Ном. потужн., <i>кВт</i>	Ном. напруга, <i>В</i>	Кількість ТЕНів	Корисна місткість, <i>л</i>	Робоча температура води, °С	Час нагріву до роб. тем-ри, <i>год</i>
УАП- 400/0,9	12	400/230	6	400	90	3
УАП- 800/0,9	18	400/230	9	800	90	5
УАП- 1600/0,9	30	400/230	15	1600	90	6

Таблиця К.2 – Термoeлектричні водонагрівачі

Умовне позначення	Призначення	Напруга, <i>В</i>	Потуж- ність, <i>кВт</i>	Мате- ріал обо- лонки	Діа- метр трубки, <i>мм</i>	Хар- ний розмір / дов- жина
ТЕН-100В13 / 2П220	Рідинні середовища, водонагрівання	230	2,0	—	13	—
ТЕН-100В13 / 3,5Р220		230	3,5	—	13	—
ТЕН- 100А13/4Р220		230	4,0	—	13	—
233-01	Побутові та промислові котли	230	1,5	AISI- 304	8,5	L = 337 <i>мм</i>
223-01		230	2,0	AISI- 304	8,5	L = 414 <i>мм</i>
513		230	2,5	AISI- 304	8,5	L = 250 <i>мм</i>
513-01		230	4,0	AISI- 304	8,5	L = 310 <i>мм</i>
668		230	4,0	Мідь	8,5	L = 320 <i>мм</i>
1287	Котли, парогенератори, опалення	400	10,0	AISI- 304	8,5	L = 740 <i>мм</i>
1275		400	12,5	AISI- 304	8,5	L = 900 <i>мм</i>

Таблиця К.3 – Термоелектричні нагрівачі повітря

Позна- чення	Призна- чення	Напруга, <i>В</i>	Потужність, <i>кВт</i>	Мате- ріал оболон- ки	Діа- метр трубки, <i>мм</i>	Характер- ний розмір / довжина
3023	Теплові вентилятори, теплові гармати, завіси	230	1,0	AISI- 304	10	L = 515 <i>мм</i>
3022	Те саме	230	1,5	AISI- 304	10	L = 423 <i>мм</i>
574	Те саме	230	2,0	AISI- 304	8,5	L = 170 <i>мм</i>
3890	Те саме	230	3,0	AISI- 304	10	L = 266 <i>мм</i>
575	Те саме	230	4,0	AISI- 304	10	L = 266 <i>мм</i>
3883- 01	Те саме	230	5,0	AISI- 304	10	L = 266 <i>мм</i>
874	Професійне теплове обладнання	230	2,0	AISI- 304	13	Штуцер G1/2
694	Те саме	230	2,5	Сталь 08Ю	13	Штуцер G1/2
4104	Те саме	230	3,2	AISI- 304	13	Штуцер G1/2
697	Те саме	230	2,5	Сталь 08Ю	13	Штуцер G1/2
698	Те саме	230	2,5	AISI- 304	13	Штуцер G1/2
699	Те саме	230	3,2	Сталь 08Ю	13	Штуцер G1/2
700	Те саме	230	3,2	AISI- 304	13	Штуцер G1/2

Додаток Л – ЕЛЕКТРООБІГРІВНІ ПІДЛОГИ

Таблиця Л.1 – Норми для розрахунку електрообігріву підлоги тваринницьких та птахівницьких ферм

Вид тварин або птиці	Рекомендована температура підлоги, °С	Питома потужність підлоги, $Вт/м^2$	Питома площа обігріву	Рекомендований крок укладання проводу, м	Типове значення температури повітря для варіантів, °С
Курчата добові	35–40	150–300	0,015–0,017 $м^2/гол$	0,05–0,10	20–26
Курчата віком 30–40 діб	35	150–300	0,03–0,04 $м^2/гол$	0,05–0,10	21
Курчата віком 60–70 діб	35	150–300	0,07–0,08 $м^2/гол$	0,05–0,10	18
Поросята-сисуні	25–30	160–250	1,0–1,2 $м^2/гніздо$	0,10–0,15	18
Поросята на відгодівлі масою 15–30 кг	25	90–150	1,1 $м^2/станок$	0,10–0,15	18
Поросята на відгодівлі масою 30–45 кг	20	90–150	1,2 $м^2/станок$	0,10–0,15	18
Свиноматки	18–20	80–150	2,0–2,5 $м^2/гол$	0,15–0,20	15–16

Таблиця Л.2 – Технічні характеристики нагрівних проводів для електрообігрівальних підлог

Показник	ПОСХВ	ПОСХП	ПОСХВТ
Зовнішній діаметр, <i>мм</i>	2,9	2,3	3,4
Діаметр жили, <i>мм</i>	1,1	1,1	1,4
Тип ізоляції	Полівінілхлоридна	Поліетиленова	Полівінілхлоридна теплостійка
Допустима робоча температура поверхні, °С	70	70	105
Опір 1 м проводу при робочій температурі, <i>Ом</i>	0,174	0,174	0,12
Питоме допустиме лінійне теплове навантаження при прокладанні в ґрунті та підлозі, <i>Вт/м</i>	9–10	11–12	16
Допустима фазна напруга, <i>В</i>	250	250	250
Електричний опір ізоляції при 20 °С, <i>МОм·км</i>	5	5	5
Ресурс роботи, <i>год</i>	12000	12000	12000

Козін Віктор Миколайович,
Савойський Олександр Юрійович,
Сіренко Юлія Володимирівна,

Електротехнології в АПВ

**Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт
для здобувачів спеціальності G3 Електрична інженерія
денної і заочної форм навчання
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет, вул. Г. Кондратьєва, 160

Підписано до друку: березень 2026 р. Формат А4: Гарнітура Times New Roman

Тираж: 60 примірників. Замовлення _____ Ум. друк. арк. 7,1
