МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В АПВ

Конспект лекцій

для здобувачів спеціальності G3 Електрична інженерія
денної і заочної форм навчання
другого (магістерського) рівня вищої освіти

Інженерно-технологічний факультет СНАУ

Суми
2026

УДК 631.3:621.3:621.365
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 :
Конспект лекцій для здобувачів спеціальності G3 Електрична інженерія денної і заочної форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти [Електронне видання] / укл.: В. М. Козін, О. Ю. Савойський, Ю. В. Сіренко. – Суми, 2026 – 157 с.

У конспекті лекцій зібраний основний теоретичний матеріал з дисципліни «Електротехнології в АПВ» відповідно до силабусу навчальної дисципліни.
Конспект лекцій призначений для вивчення, систематизації, розширення та закріплення теоретичних знань з сучасних електротехнологій, що використовуються у агропромисловому виробництві, 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.

Юрченко О. Ю., PhD, доцент, 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 № 5 від «12» березня 2026 року

© Сумський національний аграрний університет, 2026

ЗМІСТ

С.

ВСТУП.....4
Тема 1. Електротермічні установки в тваринництві.
Установки для підігріву води.....7
Тема 2. Електротермічні установки в тваринництві.
Установки для обігріву приміщень.....14
Тема 3. Електротермічні установки в рослинництві.
Установки для обігріву ґрунту.....29
Тема 4. Електротермічні установки в рослинництві.
Установки для технологічної обробки та зберігання продукції.....40
Тема 5. Електротермічні установки на ремонтних підприємствах.
Електричні печі.....46
Тема 6. Електротермічні установки на ремонтних підприємствах.....56
Тема 7. Установки електрофізичної обробки.....70
Тема 8. Електроіскрові та електроімпульсні установки.....76
Тема 9. Електрогідравлічні установки.....85
Тема 10. Ультразвукові установки.....94
Тема 11. Установки електрохімічної обробки.....109
Тема 12. Установки електрохімічної обробки. Електрографія.....119
Тема 13. Установки електронно-іонної технології.....124
Тема 14. Установки електронно-іонної технології.
Установки сепарації матеріалів.....137
Тема 15. Магнітна обробка сільськогосподарської
продукції та матеріалів.....146
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....155

ВСТУП

Електротехнології в агропромисловому виробництві (АПВ) становлять міждисциплінарний напрям електроінженерії, у межах якого електрична енергія використовується не лише як універсальний енергоносій, а й як керований технологічний фактор впливу на матеріали, середовища та біологічні об’єкти. На відміну від класичного енергопостачання, де домінують задачі перетворення, передавання та розподілу потужності, електротехнологічні процеси безпосередньо інтегрують електричне поле, струм, магнітне поле, електричні розряди та пов’язані з ними теплові, механічні, хімічні і фізико-хімічні ефекти у структуру виробничих операцій. Саме тому дисципліна «Електротехнології в АПВ» для здобувачів другого (магістерського) рівня орієнтована на формування системного бачення технологічного процесу як сукупності керованих енергетичних взаємодій, що мають чіткі критерії ефективності, надійності, безпеки та екологічної прийнятності.

Сучасне АПВ характеризується високою енергоємністю, просторовою розосередженістю об’єктів, сезонністю режимів та зростанням вимог до якості продукції. У тваринництві та птахівництві електротеплові системи визначають мікроклімат, гігієну та продуктивність; у рослинництві – керують умовами пророщування, дорощування, сушіння, зберігання та первинної переробки; у ремонтно-обслуговуючій сфері – забезпечують відновлення працездатності обладнання з використанням електричних печей, зварювальних та поверхневозміцнювальних технологій. Окремий пласт становлять електрофізичні та електрохімічні методи: електроіскрові та електроімпульсні впливи, електрогідравлічний ефект, ультразвукова обробка, електроліз, електрокоагуляція, електродіаліз, а також електронно-іонні технології (аероіонізація, електростатичне напилення, сепарація матеріалів у полях високої напруги). Усе це формує інструментарій інженера, який здатен обґрунтовано обирати фізичний принцип дії, формувати структуру установки, оцінювати енергетичні та технологічні показники, а також забезпечувати електробезпеку і відповідність вимогам охорони праці.

Метою конспекту лекцій є узагальнення теоретичних основ і прикладних підходів до розрахунку та проєктування електротехнологічного обладнання, яке застосовується в умовах АПВ. Матеріал побудований за логікою від теплових процесів до полів і розрядів, що відображає еволюцію електротехнологій: від найпоширеніших електротермічних установок до високовольтних та імпульсних систем, де вирішальними стають електрофізичні властивості середовищ, динаміка зарядоутворення і перенесення, кінетика електрохімічних реакцій та особливості енергетичного введення. Така побудова дозволяє послідовно сформувати базу понять – від джоулевого нагрівання та теплопередачі до закономірностей електричного пробою, коронного розряду, кавітації, електролітичних процесів і магнітної взаємодії.

Особливість АПВ як предметної області – поєднання технічних та біологічних обмежень. Електротехнологічний вплив часто спрямований на живі організми або біологічно активні матеріали, тому критерії «достатності» і «допустимості» задаються не лише енергоефективністю, а й безпечністю для об’єкта: допустимими температурними межами, швидкістю нагріву, рівнем електричного поля, інтенсивністю опромінення, тривалістю імпульсу, частотою повторення, а також властивостями середовища. Звідси випливає потреба у коректному нормуванні режимів і у валідації технологічного ефекту методами вимірювань: термометрією (контактною та безконтактною), вимірюванням вологості, швидкості повітря, електропровідності, pH, окисно-відновного потенціалу, параметрів електричного поля, концентрації аероіонів, а також показників якості продукції (мікробіологічних, структурних, органолептичних).

У конспекті особливу увагу приділено типології обладнання та інженерним критеріям його вибору. Для електричного нагріву води і повітря розглядаються конструкції нагрівачів, способи теплового контакту, матеріали оболонок, питання накипоутворення та корозії, а також узгодження з мережевими обмеженнями (ступінчасте керування, симісторні регулятори, розподіл навантаження по фазах). Для інфрачервоних установок важливими є спектральні характеристики випромінювача та оптичні властивості об’єкта; для високочастотного і мікрохвильового нагрівання – частота, конфігурація

резонатора/камери, узгодження з навантаженням і захист від відбитої потужності. Для електричних печей – теплотехнічні параметри футерування, рівномірність температурного поля, інерційність і ресурс нагрівальних елементів. Для зварювальних установок – зовнішня вольт-амперна характеристика джерела, режими запалювання та стабілізації дуги, параметри наплавлення і напружено-деформований стан зони термічного впливу.

Структура конспекту охоплює 15 тем, що послідовно формують уявлення про основні класи електротехнологічного обладнання: від систем підігріву води і обігріву приміщень до установок електронно-іонної технології та магнітної обробки. Для магістранта така структура є не лише оглядом, а й основою для подальшого проєктування: кожна тема містить типові конструктивні схеми, ключові параметри, базові розрахункові співвідношення і приклади практичного застосування в АПВ. Узагальнення матеріалу конспекту створює основу для виконання розрахунково-графічних робіт, проєктних завдань та науково-прикладних досліджень, у яких важливо вміти аргументовано обирати технологію, оцінювати її переваги й обмеження, а також інтегрувати установку в реальні виробничі умови (електропостачання, водопостачання, вентиляція, автоматизація, санітарні та екологічні вимоги).

Підсумовуючи, конспект лекцій треба розглядати як базу для професійної мови та інженерного мислення в галузі електротехнологій. Він поєднує опис фізичних ефектів, конструктивних рішень і прикладних областей застосування, що дозволяє сформувати у магістрантів здатність до обґрунтованого вибору технології та обладнання, критичного аналізу режимів і результатів, а також до проєктування рішень, що підвищують енергоефективність, якість і конкурентоспроможність агропромислового виробництва.

Для отримання цілісної картини вивчення дисципліни «Електротехнології в АПВ» автори наполегливо рекомендують здобувачам ознайомитися з матеріалом, викладеним у методичних вказівках з однойменного курсу до самостійної роботи.

Тема 1. ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ В ТВАРИННИЦТВІ. УСТАНОВКИ ДЛЯ ПІДІГРІВУ ВОДИ

План

1.1 Установки для підігріву води

1.2 Обґрунтування та вибір способу нагрівання

1.3 Розрахунок конструктивних параметрів установок

1.4 Види розрахунків електротермічних установок

1.1 Установки для підігріву води

Область застосування установок для підігрівання води. Ці установки застосовуються для: напування тварин; догляду за тваринами; миття посуду і тари на фермах; теплового оброблення кормів; опалення приміщень тощо.

Найбільше поширення одержали ***електродні і елементні*** водонагрівачі, тому що вони мають **cosφ ≈ 1**, ***дешеві і мають просту конструкцію*.**

У сільськогосподарському виробництві застосовуються як ***проточні***, так і ***ємнісні*** водонагрівачі. **Проточні** водонагрівачі мають ***меншу масу***, велику ***потужність***, дозволяють ***швидко одержати*** воду з необхідною температурою.

1.2 Обґрунтування та вибір способу нагрівання

Елементні водонагрівачі. Елементні водонагрівачі виконують, як правило, із герметичними нагрівачами (ТЕН-ами). Ці нагрівачі більш безпечні і мають ***постійну*** потужність порівняно з електродними нагрівачами. Такі нагрівачі мають порівняно ***невисоку*** потужність.

Типи водонагрівачів: ВЕТ, САОС, УАП мають потужності від **2** до **33 кВт** і місткість від **100** до **1600 л**.

Водонагрівач-термос означає те, що бак має термоізоляцією.

Регулятор забезпечує або нагрівання до потрібної температури або підтримку температури у заданому інтервалі.

Регулювання потужності у таких нагрівачах як правило не передбачаються. Також не передбачається захист від ***сухого ходу***.

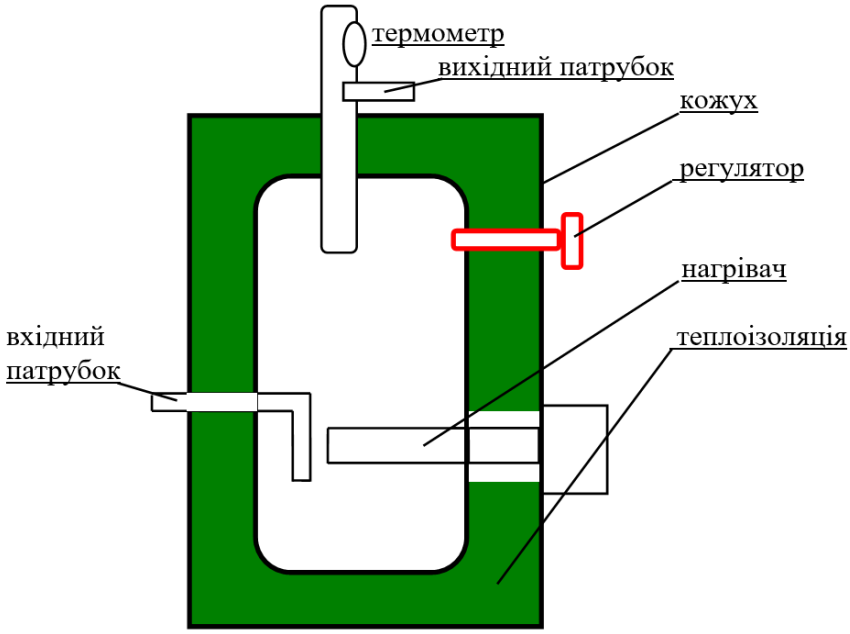


Рисунок 1.1 – Конструкція елементного водонагрівача-акумулятора

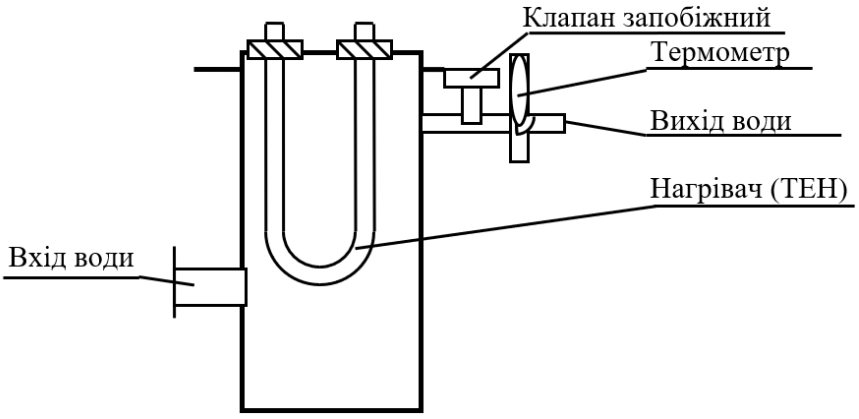


Рисунок 1.2 – Конструкція проточного водонагрівача типу ЕПВ

Водонагрівачі ЕПВ не захищені від «сухого ходу» і тому через **5–7 хв.** ТЕН виходять із ладу.

Захисний клапан призначений для скидання пару у випадку закипання води.

Таблиця 1.1 –Технічна характеристика нагрівачів ЕПВ

Тип	Потужність, кВт	Продуктивність, л/год	Маса, кг
ЕПВ-1	6	80	9,5
ЕПВ-2	9	120	9,5
ЕПВ-3	12	160	17,0
ЕПВ-4	15	195	17,0

При зменшенні напору води, зменшується продуктивність нагрівача і росте температура на виході. Тому при використанні в замкнутих системах опалення такі нагрівачі постачаються терморегулятором.

Електродні водонагрівачі. ***Електродні*** водонагрівачі (котли) застосовуються в основному для опалення різноманітних приміщень і обмежено для теплової обробки харчових рідин (***молоко, соки*** тощо). Це пов'язано із ***розчиненням*** електродів. При електродному нагріванні відбувається стерилізація води і при використанні електродів із ***графіту і нержавіючої*** сталі воду можна обмежено використовувати для поїння тварин.

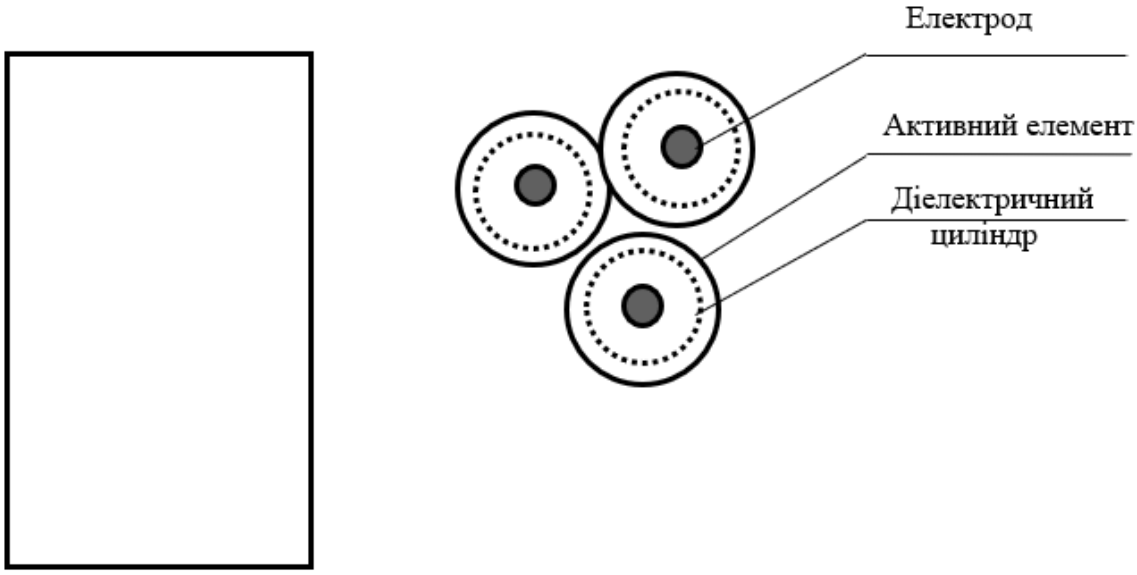


Рисунок 1.3 – Котел із циліндричними електродами

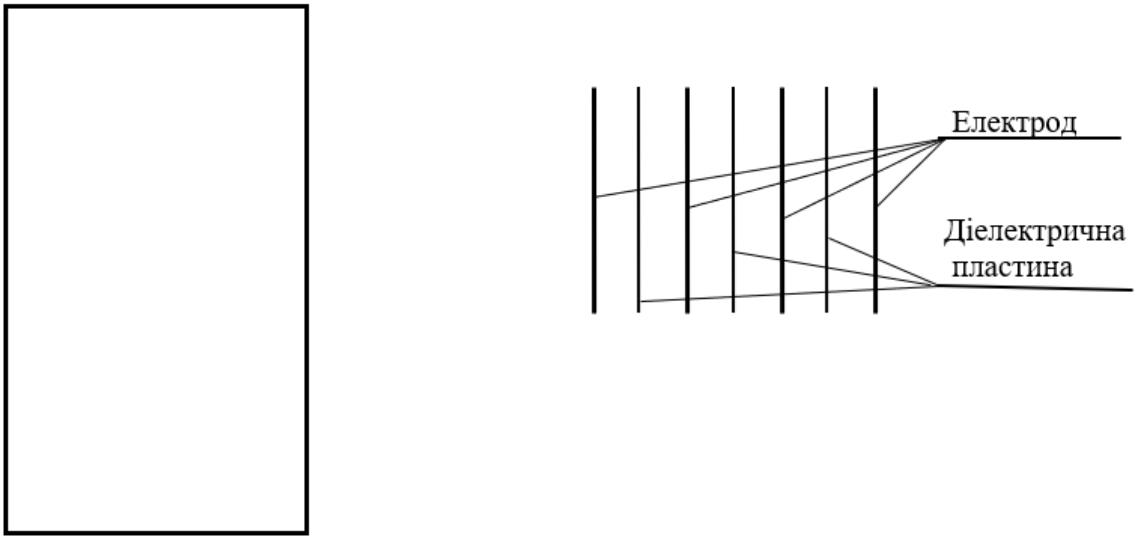


Рисунок 1.4 – Котел із пластинчастими електродами

У сільському господарстві використовувалися в основному проточні водонагрівачі типу **КЕВЗ** і **ЕПЗ**: **КЕВЗ** – котел електродний водогрійний із замкнутим контуром. Вони мають подібні конструкції.

Електродні нагрівачі термосного типу. У таких нагрівачів (на відміну від проточних) ***потужність*** у процесі нагрівання ***змінюється*** (у 2–4 рази), що зумовлено зміною питомого опору води. Для зменшення потужності застосовують ***6-електродні*** системи.

$$P = 3U^2 / 2R; \qquad P = 3U^2 / R; \qquad P = 6U^2 / R. \qquad (1.1)$$

1.3 Розрахунок конструктивних параметрів установок

При визначені потужності водонагрівачів виходять із графіка добової потреби у гарячій воді (рис. 1.5). Для ***проточного*** нагрівача потужність визначається:

$$P_{пр} = [Q_{max} \cdot \gamma \cdot c\,(t_к - t_п)] / (3600 \cdot \eta_н \cdot \eta_с), \qquad (1.2)$$

де Q_{max} – максимальна потреба (об'ємна витрата) середовища, що нагрівається, $м^3$/год;

γ – густина середовища, що нагрівається, кг/$м^3$;

с – теплоємність середовища, що нагрівається, кДж / (кг ·°С);

$\eta_н$ – ККД нагрівача;

$\eta_с$ – ККД системи транспортування гарячої води.

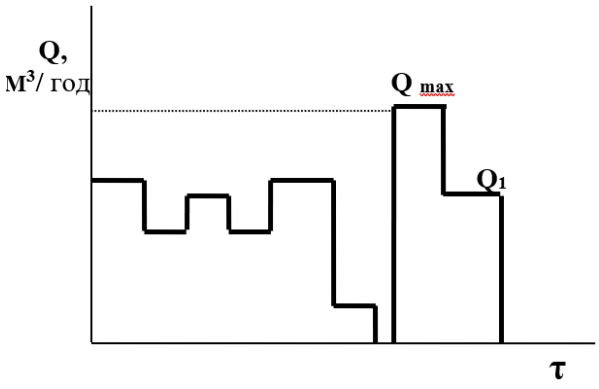


Рисунок 1.5 – Графік добової потреби гарячої води

Для водонагрівачів з ***акумулюючою ємністю*** потужність визначається за середньодобовою витратою гарячої води:

$$P_{ак} = [\gamma \cdot c \cdot \Sigma V_i (t_{кі} - t_{пі})] / (24 \cdot 3600 \cdot \tau_р \cdot \eta_н \cdot \eta_с). \quad (1.3)$$

де $\mathbf{V_i}$ – середньодобова потреба у воді і -го споживача, м^3/доба;

$\mathbf{t_{кі}}$ – кінцева температура води для і-го споживача, ^{o}С;

$\mathbf{t_{пі}}$ – початкова температура води для і-го споживача, ^{o}С.

Об'єм акумулюючої ємності, визначається з рівняння теплового балансу, записаного для акумулюючої ємності з урахуванням сумарної кількості тепла, відданого споживачу з водою:

$$V_{ак} \cdot (t_к - t_п) \cdot \eta_н \cdot \eta_с = \Sigma V_i (t_{кі} - t_{пі}). \quad (1.4)$$

де $V_{ак}$ – об'єм акумулюючої ємності, м^3;

$t_к$ – кінцева температура води в ємності, °С;

$t_п$ – температура вхідної води, ^{0}С;

V_i– потреба у воді і -го споживача;

$t_{кі}$ – кінцева температура води для і -го споживача.

$$V_{ак} = \Sigma V_i (t_{кі} - t_{пі}) / [(t_к - t_п) \cdot \eta_н \cdot \eta_с]. \quad (1.5)$$

Акумулюючі ємності виконують окремо від нагрівача. Для акумулюючих водонагрівачів як правило використовують ***елементні нагрівачі***. Для проточних – як елементні, так і електродні. При великих потужностях віддають перевагу електродним водонагрівачам.

1.4 Види розрахунків електротермічних установок

Відрізняють ***перевірний*** та ***конструктивний (проєктний або повний)*** розрахунок електротермічних установок.

Перевірний розрахунок виконують для визначення паспортних даних електротермічної установки при їх відсутності або для встановлення можливості використання готової установки у конкретних умовах експлуатації, які відрізняються від паспортних.

Повний розрахунок включає тепловий, електричний, конструктивний, техніко-економічний, аеродинамічний або гідравлічний, міцнісний.

Тепловий розрахунок проводять з метою визначення технологічних даних установок (потужності, температури поверхні нагрівних елементів,

інтенсивності тепловіддачі, параметрів теплової ізоляції, тепловий ККД), що забезпечують технологічні вимоги, які визначають по єдиній для усіх електротермічних установок методики.

Електричний розрахунок тісно пов'язаний з тепловим і полягає у виборі напруги живлення, роду струму, частоти, у визначенні геометричних розмірів нагрівача, електричного ККД та коефіцієнту потужності, розробки схеми керування та способу регулювання потужності або продуктивності.

Аеродинамічний розрахунок пов'язаний з розрахунком витрат повітря (газу), який проходить через установку, вибором вентиляторів або компресорів, визначенням перерізу повітряних трубопроводів та розмірів розподільчих решіток. Від правильності рішення цього питання залежить тепловіддача нагрівних елементів, терміну служби, тепловий та електричний ККД.

Гідравлічний розрахунок виконують для визначення витрати рідини через установку, вибору насосу та перерізу трубопроводу.

Конструктивний розрахунок проводять з метою визначення геометричних розмірів установки, маси.

Техніко-економічний розрахунок проводять з метою визначення маси установки, компактності, матеріалоємності та її теплової і енергетичної (у тому числі ексегетичної) ефективності.

Міцнісний розрахунок проводять з метою визначення необхідних механічних навантажень на елементи установки, що дозволяє підібрати та перевірити необхідні товщини стінок, фланцеві з'єднання, способи з'єднання деталей у апараті тощо.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 1

1 Які основні призначення підігріву води в тваринництві?

2 Які вихідні дані потрібні для розрахунку водонагрівача?

3 У чому відмінність проточних і накопичувальних водонагрівальних установок?

4 Які конструктивні варіанти електронагрівачів та їхні переваги і недоліки?

5 Що таке баланс теплонадходження і тепловтрат у водонагрівальній установці та навіщо він потрібен?

6 Які фактори найбільше впливають на енерговитрати при підігріві води в реальних умовах АПВ?

7 Які вимоги електробезпеки є критичними для електронагріву води?

8 Як пояснити принципову схему (рис. 1.5) водонагрівальної установки?

9 Які типові причини відмов водонагрівальних установок і як їх попереджати?

10 Які способи регулювання температури води застосовують у таких установках?

Тема 2. ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ В ТВАРИННИЦТВІ. УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБІГРІВУ ПРИМІЩЕНЬ

План

2.1 Установки для обігріву приміщень

2.2 Обґрунтування, розрахунок та вибір системи і виду електрообігріву

2.1 Установки для обігріву приміщень

Класифікація електричних систем опалення: Електричні системи опалення класифікують за такими **ознаками**:

1. За **радіусом дії**:

а) ***централізовані (центральні)***;

б) ***індивідуальні.***

2. За **способом теплопередачі**:

а) ***конвективного*** повітряного опалення;

б) ***променевого (радіаційного)*** опалення;

в) ***комбінованого*** (***конвективно-радіаційного***) опалення.

3. За способом **використання** електричної енергії:

а) ***прямого*** опалення:

– **з акумуляцією** теплоти;

– **без акумуляції** теплоти.

б) ***непрямого*** опалення:

– з ***тепловими насосами***;

– з **теплообмінниками**.

4. За **технічним виконанням**:

а) ***електрокалориферні***;

б) ***електрокотельні***;

в) ***з електрообігріваною підлогою***;

г) ***променеві***;

д) ***комбіновані***.

Електротермічне обладнання для прямого опалення. Найбільш

поширене застосування цього виду обладнання отримали: електрокалориферні та припливно-витяжні установки.

Електрокалориферні установки. Основними елементами електрокалориферної установки є: ***електричний калорифер*** та ***вентилятор*** з електродвигуном. ***Електрокалорифер*** являє собою блок електронагрівних елементів (ТЕНів), які встановлені у металевому корпусі з ***шаховим*** (краща теплопередача, але більші гідравлічні втрати) або ***коридорним*** (гірша теплопередача, але менші гідравлічні втрати) розміщенням нагрівальних елементів.

Як нагрівні елементи застосовують оребрені ТЕНи або відкриті спіралі, зиґзаґи, гофровані стрічки, виготовлені зі спеціальних сплавів. При використанні оребрених ТЕНів підвищується надійність та термін служби калориферів, а також забезпечуються безпечні умови їх експлуатації. Наявність оребрення дозволяє суттєво підвищити теплопередачу, що дозволяє зменшити необхідну площу поверхні нагрівання і, як результат, підвищується компактність установки за рахунок зменшення її габаритних розмірів. Однак разом з тим, оребрені ТЕНи створюють значно більший аеродинамічний опір, що треба враховувати при виборі вентилятора і електропривода до нього.

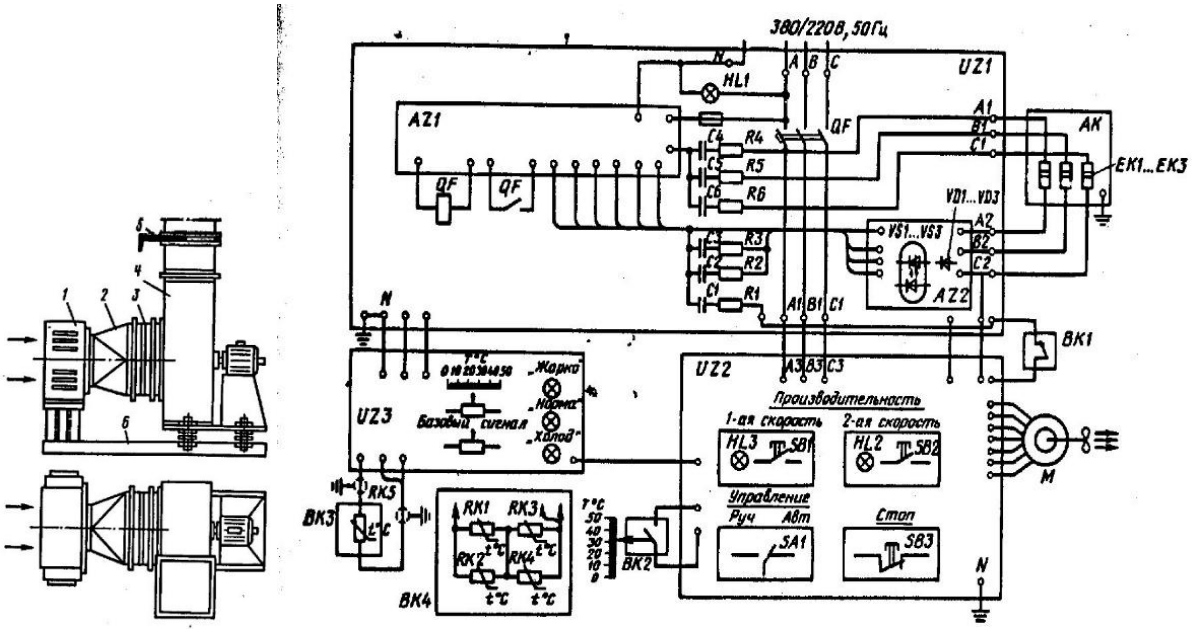
При використанні відкритих нагрівачів значно зменшується аеродинамічний опір калорифера, зменшується його маса і габарити. Однак термін служби і електробезпечність калорифера може бути знижена.

У сільськогосподарських приміщеннях найбільш розповсюджені установки типу СФОА і СФОЦ, які складаються із уніфікованого електрокалорифера типу СФО, відцентрового вентилятора Ц-4-70 і шафи керування. Вони мають аналогічні релейно-контактні схеми керування, що дозволяє ступенево регулювати потужність нагрівних елементів та теплопродуктивність установки. Модифіковані установки СФОЦ-И (И1, И3) мають електронні регулятори та двошвидкісний електродвигун. Основна номенклатура та технічні характеристики даного типу установок наведено у табл. 2.1. Схема керування

установкою СФОЦ И3 наведено на рис. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні дані серійних електрокалориферних установок

Електрокалориферна установка	Встановлена потужність, кВт	Витрата повітря, $м^3$/год	Підігрів повітря, °С	Температура повітря на виході, °С
СФОЦ-16И1	16	1800	35	50
СФОЦ-25И1	24	2500	35	50
СФОЦ-40И1	47	3500	50	50
СФОЦ-60И1	69	4000	65	50
СФОЦ-100И1	97	5000	70	50
СФОЦ-16И3	16	3600	35	50
СФОЦ-25И3	24	5000	35	50
СФОЦ-40И3	47	7000	50	50
СФОЦ-60И3	69	8000	65	50
СФОЦ-100И3	97	10000	70	50



а *б*

Рисунок 2.1 – Конструкція (а) і схема електрична принципова (б) керування роботою електрокалориферної установки:
1 – фільтр механічний; 2 – дифузор; 3 – антивібраційна вставка;
4 – вентилятор; 5 – засувка; 6 – рама

Комплекси припливно-витяжних установок (ПВУ). Ці установки призначені для забезпечення роботи систем вентиляції і опалення тваринницьких приміщень. Виготовляється дві модифікації таких установок: ПВУ-6 і ПВУ-9. У кожний комплекс входить по шість установок і пульт

керування. Комплекси різняться один від одного встановленою потужністю, розмірами та продуктивністю установок, які є вентиляційними пристроями. У вентиляційних пристроях суміщені приплив та витяжка повітря. Внутрішній циліндр призначений для відведення повітря із приміщення. Зовнішнє повітря надходить через кільцевий канал, який створюється зовнішнім і внутрішнім циліндрами. Установка складається із чотирьох секцій. Секція вентилятору призначена для транспортування забрудненого та свіжого повітря, підігріву та розподілення у просторі припливного повітря. Секція має електродвигун, на вал якого надіте робоче колесо і шість трубчатих електричних нагрівачі для підігріву припливного повітря. На робочому колесі встановлено два ряди лопатей, які мають нахил у різні сторони. Внутрішній ряд лопатей забезпечує витяжку, а зовнішній – приплив повітря.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики установок ПВУ

Параметр	ВПУ-6	ПВУ-9
Подача повітря, $м^3$/год:		
на припливі	6000	9800
на витяжці	5800	8800
Потужність нагрівальних елементів, кВт	16	19,6
Кількість установок к комплекті, шт.	6	6
Кількість нагрівальних елементів, шт.	6	6
Потужність електродвигуна, кВт	1,1	2,2

У нижній частині секції по колу кільцевого каналу розміщені повітророзподільчі сопла. Секція змішувальних заслінок призначена для регулювання ступеня циркуляції повітря. Внутрішній циліндр секції має розрив, у який встановлено регулювальні заслінки. Якщо заслінки відкриті, то у приміщення надходить лише зовнішнє повітря, а якщо прикриті частково, тоді частина видаленого повітря змішується із зовнішнім і повторно надходить (або рециркулює) до приміщення. Для керування положенням заслінок

використовується синхронний електродвигун.

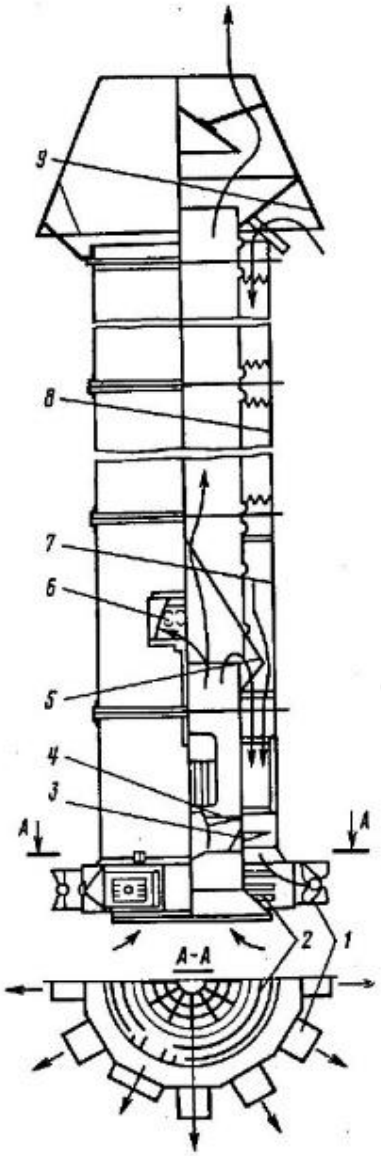


Рисунок 2.2 – Установка ПВУ:

1 – патрубок подачі підігрітого повітря; 2 – нагрівальний елемент; 3 – лопаті припливного вентилятора; 4 – лопаті витяжного вентилятора (суміщені з поз. 3) з приводом від електродвигуна; 5 – регулююча заслінка змішувального пристрою; 6 – внутрішній напрямний елемент; 7 – внутрішня перегородка з тепловими компенсаторами; 8 – зовнішній корпус; 9 – зовнішній напрямний елемент

Проміжна секція, яка призначена для з'єднання секції змішувальних заслінок з зонтом, складається із внутрішнього і зовнішнього циліндрів. Зонт застосовують для захисту установки від потрапляння атмосферних опадів, забору свіжого і відведення забрудненого повітря. Його складальні одиниці: припливний кожух, витяжний дифузор і основа. Кожна припливно-витяжна

установка комплектується силовим блоком, який містить пускову, захисну, сигнальну апаратуру і пост ручного керування. Пульт централізованого керування з комплектом термосистем призначений для централізованого автоматичного і ручного керування комплектом установок. До пульту підключають не більше шести установок (див. рис. 2.2).

Обладнання з акумуляцією теплоти. В установках цього типу передбачено два режими роботи: заряджання – нагрівання акумулюючої серцевини і розряджання – віддача теплової енергії від серцевини до споживача. Матеріал серцевини обирають, виходячи з того, щоб він був дешевим, витримував велику робочу температуру і мав значну теплоємкість, а також не втрачав своїх властивостей при багаторазовому використанні (магнезит або бетон).

Застосовуються установки типу ЕОКС-150/0,4 И1, які призначені для підігрівання повітря у тваринницьких приміщеннях: потужність 150 кВт; напруга 400/230 В; час заряджання – 8 годин.

Недоліки: встановлена потужність у 3 рази більше, ніж під час прямого нагрівання; потребує реконструкції існуючих мереж; займає значну виробничу площу.

Електротермічне обладнання для непрямого опалення. Встановлену потужність калорифера можна зменшити, якщо утилізувати тепло, яке видаляється разом із забрудненим повітрям. Для утилізації тепла використовують теплообмінні апарати і теплові насоси.

Теплообмінні апарати бувають ***рекуперативні*** та ***регенеративні***. У ***рекуперативних*** теплообмінниках тепло передається від «гарячого» повітря, що видаляється, до припливного холодного через розділювальну стінку (листова сталь, фольга, скло, пластмаса, лавсанова плівка тощо). У регенеративних теплообмінних апаратах матеріал, через який відбувається перенесення тепла – насадка (алюмінієві пластини, щебінь та ін.), які почергово знаходяться у контакті то з «гарячим» повітрям, що видаляється, то з припливним «холодним» і передає тепло від першого теплоносія до другого.

Головною причиною, що стримує застосування теплообмінних апаратів у

системах опалення тваринницьких ферм є висока ***вірогідність заморожування теплопередавальних поверхонь*** при низьких температурах довкілля.

З усіх конструкцій рекуперативних теплообмінників найбільш вдалою є конструкція апарата типу **ТСН**, який являє собою пакет (секцію) теплообмінних металевих пластин, що розділені перегородками на канали. Через одні канали рухається холодне припливне повітря, а через інші – видаляється тепле повітря. Площа всіх секцій, утворених пластинами, прямопропорційно залежить від проєктної теплопродуктивності установки, і для апарату типу ТСН складає **38 м^2.** Одна секція теплообмінника розрахована на подачу **1 м^3** повітря на секунду. Залежно від подачі припливної вентиляції теплообмінник виконується ***одно-*** або ***багатосекційним***.

Розроблена електрокалориферна установка сільськогосподарського призначення з ***регенеративним*** теплообмінником (рис. 2.3).

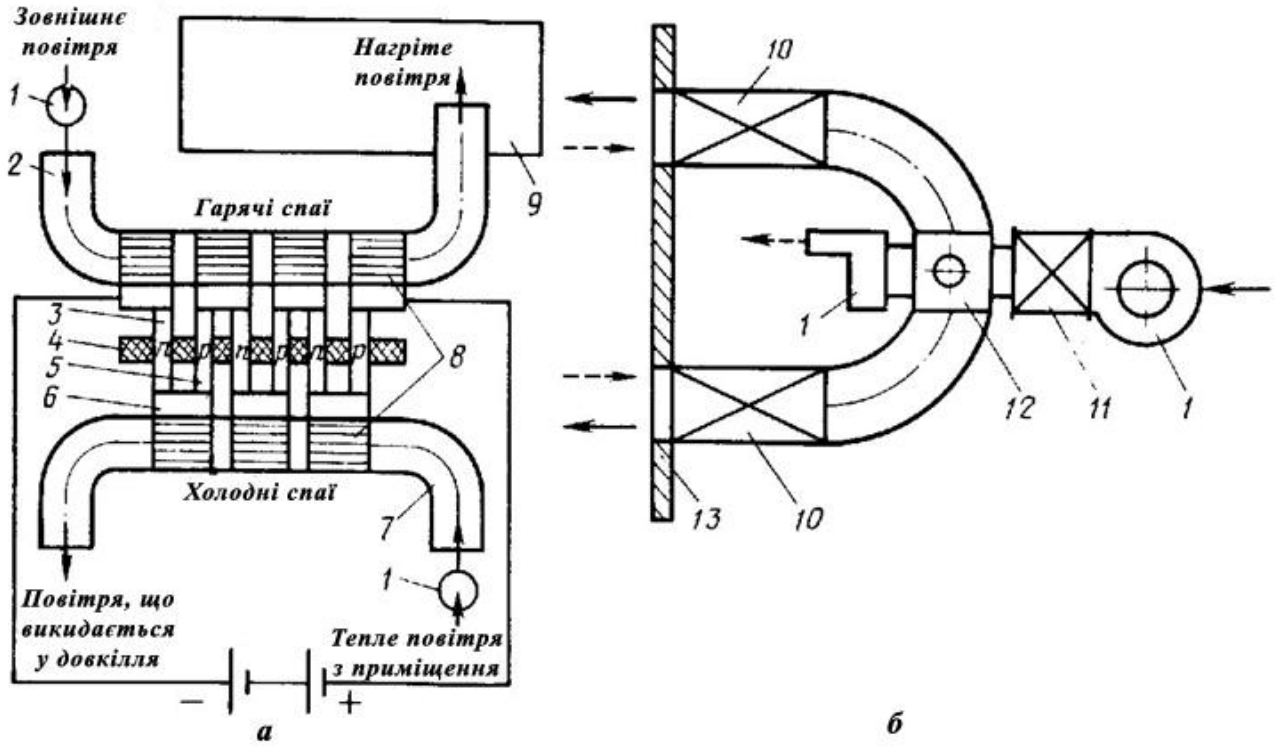


Рисунок 2.3 – Схеми використання у системах опалення приміщень:
а – теплового насосу; б – утилізатора тепла; 1 – вентилятор;
2, 7 – повітропроводи; 3, 5 – гілки термоелементів з електронною (n) і дірковою (p) провідністю; 4 – перегородка, що ізолює гарячі і холодні спаї; 6 – пластина спаю термоелементів; 8 – радіатори; 9 – опалюване приміщення; 10 – секція регенеративного теплообмінника; 11 – електрокалорифер; 12 – пристрій перемикання заслінки; 13 – стіна приміщення

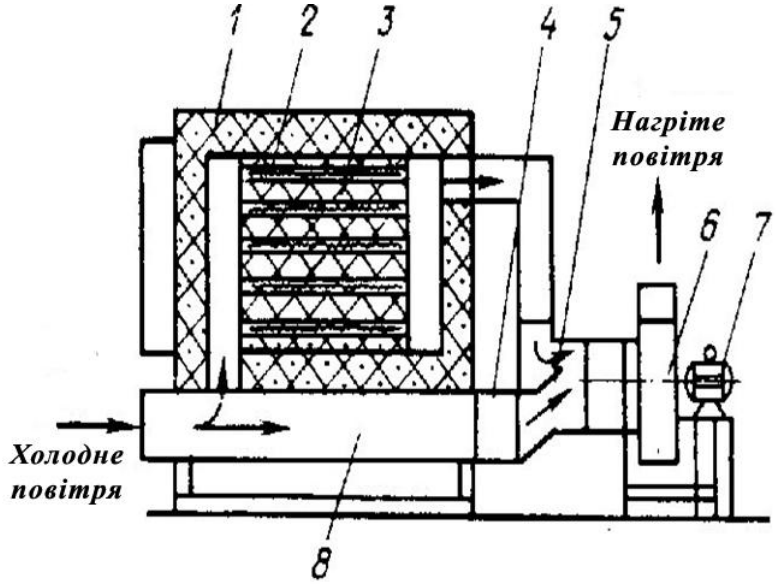


Рисунок 2.4 – Вентиляційно-опалювальна установка ЕОКС-150/0,5-В1:
1 – теплоізолюючий кожух; 2 – електронагрівач; 3 – теплоакумулююча серцевина; 4 – електрокалорифер; 5 – регулююча заслінка змішувального пристрою; 6 – вентилятор; 7 – електродвигун; 8 – байпасний канал

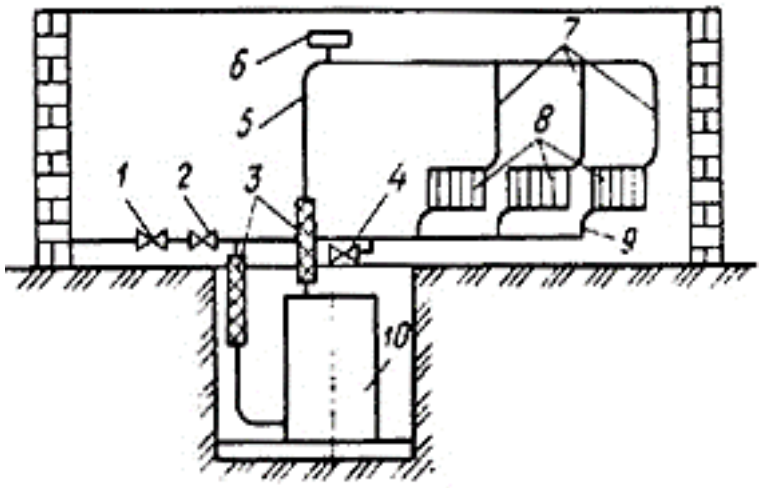


Рисунок 2.5 – Система опалення приміщення
з використанням ємнісного водонагрівача:
1, 4 – вентилі водопровідний та для спуску води з системи; 2 – зворотний клапан; 3 – ізолюючі вставки; 5, 9 – живильна і зворотна магістралі; 6 – розширювальний бак; 7 – підвідні трубопроводи до батарей; 8 – батареї опалення; 10 – електроводонагрівач

Повітря із приміщення підігрівається у калорифері **2** до **303–308 К** і через вузол **3** переключення засувки подається в одну із секцій теплообмінника. При проходженні через насадку теплообмінника (алюмінієві гофровані і гладкі пластини, встановлені почергово), повітря нагріває її, а охолоджене повітря

відводиться на зовні. Одночасно другий вентилятор подає свіже повітря у іншу секцію, де воно нагрівається від насадки і через вузол переключення **3** подається у приміщення. Засувка через **2–5** хвилин перемикається, що забезпечує періодичну зміну напряму руху повітря у секціях. Теплова потужність установки **40 кВт** при встановленій потужності **16 кВт**, подача повітря – **1 м^3/с**.

Теплові насоси – це пристрої, що забезпечують реалізацію оберненого циклу Карно. У результаті цього за рахунок зовнішнього споживання енергії забезпечується перенесення теплової енергії з низко- на високотемпературний рівень. Найбільше поширення отримали ***парокомпресійні*** теплові насоси, які мають найбільшу енергоефективність. Також можна зустріти ***абсорбційні*** і ***термоелектричні*** типи теплових насосів. Абсорбційні теплові насоси працюють від енергії вторинних (скидних) теплових потоків і електрична енергії споживається ними лише для забезпечення приводу циркуляційних і живильних насосів, значно рідше, замість вторинних теплових потоків для забезпечення роботи (для пароутворення робочого тіла у генераторі теплового насосу) може використовуватися електрична енергія для ТЕНів. Термоелектричні теплові насоси забезпечують перенесення тепла за рахунок використання термоелектричного спаю з p-n переходом.

Як джерело низькопотенційної енергії, що підводиться до теплових насосів, часто використовують природні джерела: ***землю, сонце, воду***. Також ефективно використовувати теплову енергію скидних потоків різних промислових виробництв, наприклад, компресорних установок, теплоелектроцентралей, потоків повітря систем вентиляції тощо.

Електричні засоби локального обігріву. При використанні електричних засобів місцевого обігріву зменшується витрати енергії на опалення приміщень, покращується температурно-вологісний режим у зоні перебування тварин та птиці, завдяки чому знижаються простудні захворювання, підвищуються прирости маси, зменшується собівартість продукції (приблизно на 25 %) і зменшуються витрати кормів. До засобів місцевого обігріву відносяться: електрообігрівні ***підлоги***, ***панелі, електрокилимки, електрогрілки*** для ягнят, ***інфрачервоні випромінювачі*** та ***брудери***, установки ***сумісного*** (комбінованого)

інфрачервоного і ультрафіолетового ***випромінювання*** «ІКУФ» і «Луч».

Електрообігрівні підлоги застосовують для загального і місцевого обігріву. Поперечний переріз електрообігрівної підлоги наведено на рис. 2.4.

Після закладання нагрівного елементу **7**, встановлюють захисну сітку **8**, яку з'єднують з ***нульовим*** проводом. ***Ширина*** обігріваючої полоси, які можуть бути з ***торцевим*** або з ***центральним*** підключенням, залежить від виду тварин. ***Торцеве*** підключення більш зручне, тому що шинний канал розташовано у важкодоступному для тварин місці. Рекомендована ***довжина*** обігрівної полоси – **30–35 м**.

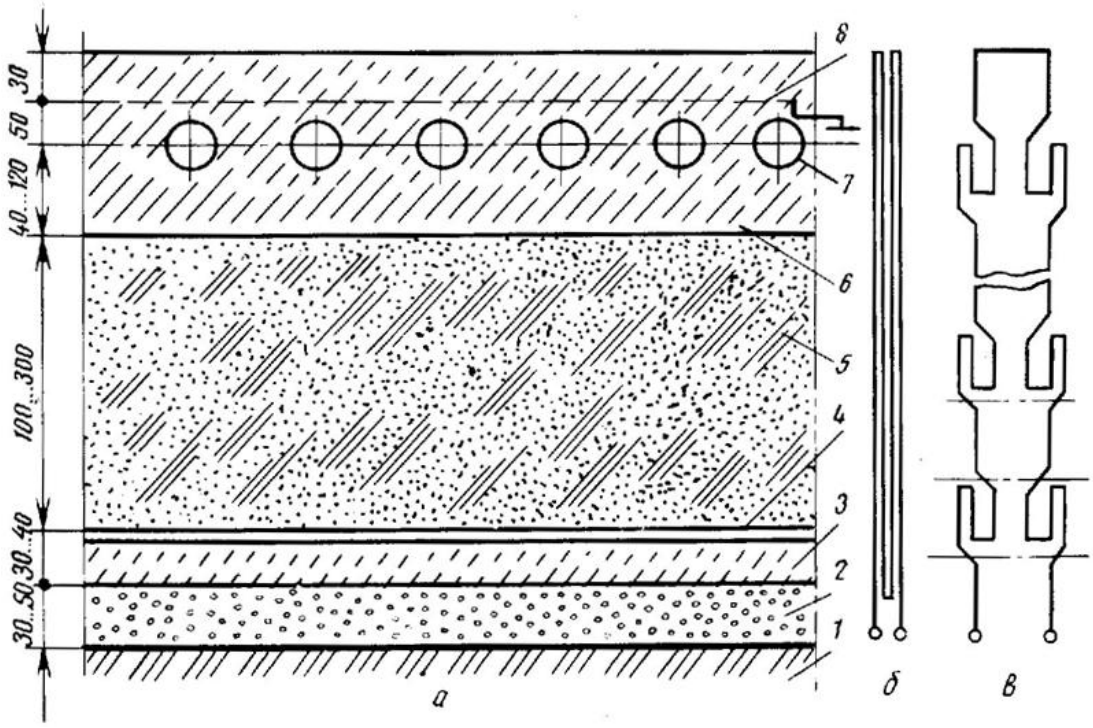


Рисунок 2.6 – Конструкція електрообігрівної підлоги:
а – схематичний розріз; б, в – способи прокладання нагрівального проводу; 1 – ущільнений ґрунт; 2 – щебінь; 3, 6 – бетон; 4 – гідроізоляція; 5 – теплоізоляція (котельний шлак); 7 – нагрівний елемент (провід); 8 – сітка екрануюча; ПС і ПП – площадки для свиноматок і поросят

Під час розрахунку обігрівних підлог необхідно:

– вибрати матеріал нагрівного елементу;

– визначити довжину;

– визначити переріз;

– визначити спосіб розміщення.

Матеріал елементу повинен відповідати ряду вимог:

1) допустима температура нагрівання (373 К);

2) допустима лінійна потужність (7–40 Вт/м);

3) допустима довжина (200 м);

4) допустима механічна міцність;

5) працездатність при температурі, яка обумовлена технологією.

Найкращими матеріалами електронагрівальних елементів є: ***ніхром*** і ***константан***.

Недоліки сталі: великі індуктивний опір, температурний коефіцієнт опору, коефіцієнт лінійного розширення.

Застосовують також нагрівні проводи марок: ***ПОСХВ; ПОСХП; ПОСХВТ***.

Довжина і площа перерізу нагрівного елементу залежить від: допустимої ***температури*** проводу і поверхні підлоги, а також від його ***електричних властивостей.***

Електрообігрівальні панелі призначені для опалення виробничих і побутових приміщень (рис. 2.7). Вони різняться:

– за способом ***тепловіддачі****:*

1) з ***односторонньою;***

2) з ***двосторонньою***;

– за способом **встановлення**:

1) ***настінні;***

2) ***підлогові;***

3) ***встановлені у перебірках***;

– за **типом** нагрівного елементу:

1) ***нагрівний кабель***;

2) ***ТЕН***;

3) ***індукційні***;

4) ***провід із високоомних сплавів***;

5) спеціальні ***струмопроводячі тканини*** (УТТ-2; ПАН-90);

6) ***напівпровідникові плівкові*** елементи;

– за способом **укладання** нагрівного елементу:

1) у спеціальні ***пустоти***;

2) ***бороздами;***

3) ***монолітом***;

– за **матеріалом** наповнювача: бетон, асфальтобетон, бетон з наповнювачем із цегли або котельного шлаку.

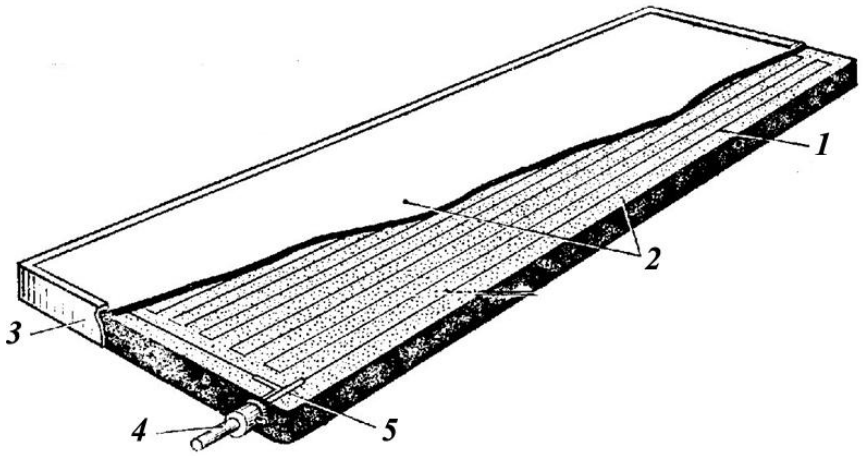


Рисунок 2.7 – Конструкція електричної обігрівальної панелі:
1 – нагрівний елемент (провід); 2 – гума хімічностійка; 3 – металевий каркас; 4 – провід мідний; 5 – місце гарячого паяння

Найбільш розповсюджені панелі з нагрівними проводами ***ПОСХВ; ПОСХП; ПОСХВТ.***

Недоліки нагрівних поводів: споживана потужність у холодному стані на 20–30 % більше, ніж у гарячому; опір ізоляції за період експлуатації зменшується з 500 до 0,45 МОм.

2.2 Обґрунтування, розрахунок та вибір системи і виду електрообігріву

Вибір живильної напруги та матеріалу нагрівача.

Потужність нагрівача

$$P = U^2 / R_t = U^2 \cdot S / (\rho_t \cdot l). \quad (2.1)$$

Якщо прийняти, що $V = S \cdot l$ – об’єм; $\Delta U = U / l$ – напруга на 1м нагрівача, тоді

$$P = (U^2 / \rho_t) \cdot V. \quad (2.2)$$

З формули (2.2) очевидно, що з підвищенням напруги можна знизити витрату активних матеріалів. Однак підвищення напруги підвищує вимоги до ізоляції. У сільськогосподарських установках використовують напругу **400/230 В**. У приміщеннях з підвищеною безпекою – **12–36 В**

$$P= I^2R = I^2 \cdot \rho \cdot l / S,$$

якщо $m = \gamma \cdot l \cdot S$**,** де **γ** – густина, кг/м^3; m – маса, кг, тоді

$$P= I^2 \cdot \rho \cdot m / (\gamma S^2) \text{ або } m = P \gamma / l \cdot S. \quad (2.3)$$

З урахуванням (2.3), отримаємо:

$$m = P \gamma / (j^2 \cdot \rho). \quad (2.4)$$

Методика розрахунку елементних нагрівачів. На практиці найчастіше застосовують наближені методи розрахунків. Ці методи засновані на різноманітних експериментальних даних. Один із таких методів – розрахунок ***за робочим струмом***. У основу методу покладені експериментальні залежності між струмом, температурою і перерізом проводу. Ці залежності одержують для проводу, натягнутого у спокійному повітрі, при температурі **20 °С**.

Методика розрахунку

1. Визначають ***робочий струм*** нагрівача:

$$I_р = P / U_н ; \qquad I_р = P / \sqrt{3}\ U. \quad (2.5)$$

2. Вибирають ***матеріал*** нагрівача і ***визначають*** бажану $t_б$ температуру нагрівача відповідно до технічного процесу і норм теплового навантаження.

3. Визначають ***розрахункову (фіктивну)*** температуру:

$$t_{розр} = k_м\, k_с\, t_б, \quad (2.6)$$

де $k_м$, $k_с$ – коефіцієнти, які враховують умови монтажу і навколишнього середовища.

Коефіцієнт монтажу $k_м$ враховує погіршення тепловіддачі від нагрівача, і отже, збільшення його температури в реальних умовах. $k_м \le I$;

Коефіцієнт середовища $k_с$ враховує підвищення тепловіддачі внаслідок впливу параметрів середовища $k_с > 1$;

4. За $I_р$ і $t_{розр}$ знаходять діаметр проводу і визначають площу перерізу.

5. Визначають довжину дроту:

$$L = U_ф^2 \cdot S / (P_ф \cdot \rho_t), \quad (2.7)$$

де ρ_t – питомий опір при робочій температурі;

$P_ф$ – потужність однієї секції.

Розрахунок нагрівальних проводів

1. Визначають **довжину** проводу

$$L = P_{вст} / p_{1доп}, \quad (2.8)$$

де $P_{вст.}$ – встановлена потужність, Вт;

$p_{1доп.}$ – допустима питома потужність, Вт/м; $p_{доп.}$ для ПОСХВ, ПОСХП – **11 Вт/м**; ПОСХВТ – **16 Вт/м**;

2. Визначають **падіння напруги** U_L на 1 м проводу

$$U_L = \sqrt{p_{1доп} \cdot R_L}. \quad (2.9)$$

де R_L – опір 1 м проводу.

3. Визначають **довжину** нагрівальної секції L_C

$$L_C = U / U_L. \quad (2.10)$$

4. Визначають **необхідну кількість секцій**

$$n_c = L / L_C. \quad (2.11)$$

Кількість секцій n_c повинна мати ціле число. У протилежному випадку задають **робочу питому потужність** менше допустимої і розрахунок повторюють.

При цьому доцільно взяти

$$p_{2доп} = p_{1доп.} / (n_2 / n_1)^2. \quad (2.12)$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 2

1 Які джерела тепловтрат у тваринницьких приміщеннях є основними?

2 Що таке «система електрообігріву» і з яких елементів вона складається?

3 Поясніть різницю між конвекційним і променистим обігрівом.

4 Які критерії вибору способу обігріву приміщення?

5 Які переваги та недоліки електрокалориферів або тепловентиляторів для тваринництва?

6 Які особливості електрообігріву підлог або локальних зон утримання тварин?

7 Які параметри мікроклімату потрібно контролювати при електрообігріві?

8 Які дані подані в табл. 2.1 і як їх використовувати при виборі системи обігріву?

9 Поясніть схему (за рис. 2.1): які вузли визначають роботу системи?

10 Які вимоги до автоматизації обігріву приміщень у тваринництві?

Тема 3. ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ В РОСЛИННИЦТВІ. УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБІГРІВУ ҐРУНТУ

План

3.1 Установки для обігріву ґрунту

3.2 Обґрунтування, розрахунок та вибір системи і виду електрообігріву

3.1 Установки для обігріву ґрунту

Захисний ґрунт – земельні ділянки, що мають укриття, у яких створений мікроклімат, необхідний для позасезонного вирощування рослин.

До споруджень захисного ґрунту ставляться парники, теплиці, а також утеплений ґрунт.

Обігрів таких споруд здійснюється за рахунок сонячної енергії, біопалива (гній, різноманітні відходи органічної природи як природні так і штучні), використання теплових насосів, електричних теплих підлог, а також гарячого теплоносія від котельних установок, вторинних енергоресурсів технологічних процесів промисловості.

У південних областях **сонячний обігрів** може бути єдиним джерелом теплості для утеплення ґрунту.

Біологічний обігрів застосовується у парниках і теплицях. Він базується на виділенні тепла під час спалювання біопалива (продукту життєдіяльності бактерій).

Найбільше надійний – **технічний обігрів.** Він буває водяним, повітряним, електричним і комбінованим (водяний і повітряний).

Джерелом теплопостачання можуть бути котельні (центральні і спеціальні), теплові відходи промислових підприємств і тепло електростанцій, тепло генератори, електричні калорифери, підігрівачі води.

Типи культиваційних споруджень. Утеплений ґрунт. При такому виді захищеного ґрунту застосовують невеличкі і прості укриття, що складаються з легкого каркаса, покритого прозорою полімерною плівкою. У них вирощують ранні овочі і розсаду Такі укриття можуть бути ***стаціонарними*** і ***переносними***.

а *б*

Рисунок 3.1 – Профілі конструкцій споруд захищеного ґрунту (парники):
а – укриття тунельного типу; б – двоскатне укриття

Для обігріву використовують труби з гарячою водою, що вкладають на глибині 30–40 см. Відстань між ними – 70–80 см.

Парники – малогабаритні культиваційні спорудження, призначені для вирощування розсади і ранніх овочів. Вони являють собою траншеї з дерев'яним або залізобетонним коробом, закриті поверх заскленими рамами або плівкою.

Парники будують за двома видами конструктивних виконань, поданими на рис. 3.2.

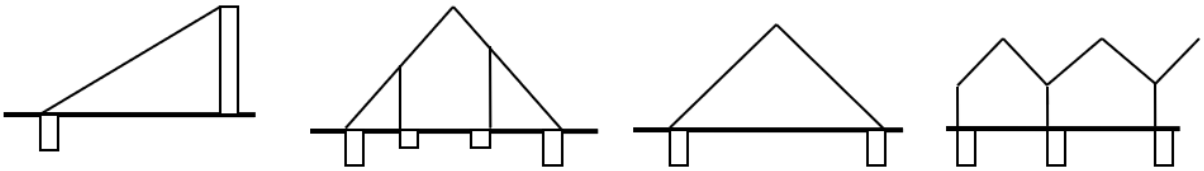
а *б*

Рисунок 3.2 – Конструкції споруд захищеного ґрунту (парники):
а – односкатні; б – двоскатні

Теплиці є постійними (стаціонарними) спорудами захищеного ґрунту порівняно з парниками. Від парника вони відрізняються тим, що мають більший розмір, дозволяють персоналу знаходитися всередині і виконувати всі агротехнічні заходи, у т. ч. із використанням засобів механізації. Також теплиці як правило мають інші (більш масивні) елементи конструкції, також часто використовуються скло, стабілізований пластик тощо у вигляді збірних модулів, тоді як парники мають полегшену конструкцію рами і світлопропускної

поверхні, для якої часто використовують ПВХ плівку. У зв'язку з цим термін служби парника є набагато меншим ніж теплиці.

Види конструктивного виконання теплиць наведені на рис. 3.3.



а *б* *в* *г*

Рисунок 3.3 – Конструктивні виконання теплиць:
а – односкатна; б – двоскатна з внутрішніми опорами;
в – двоскатна без внутрішніх опор; г – ангарна

3.2 Обґрунтування, розрахунок та вибір системи і виду електрообігріву

Тепловий розрахунок споруд закритого ґрунту (теплиці і парники). Потужність системи обігріву визначається з рівняння теплового балансу:

$$P_{об.} = P_{огр.} + P_{інф} + P_{гр}, \quad (3.1)$$

де $P_{огр.}$ – тепловтрати через огородження, Вт;

$P_{інф}$ – тепловтрати з інфільтрацією повітря через нещільності, Вт;

$P_{гр}$ – тепловтрати через ґрунт, Вт.

Тепловтрати через огородження розраховують за виразом:

$$P_{огор} = K_{огор} \times F_{огор} (t_в – t_з), \quad (3.2)$$

де $K_{огор}$ – коефіцієнт теплопередачі огорожі, Вт / (м^2·°С);

$F_{огор}$ – площа огороджень, м^2;

$t_в$, $t_з$ – температура усередині і зовні приміщення;

$$t_з = t_{сер} + 0{,}6 \times (t_{min} – t_{сер}), \quad (3.3)$$

де $t_{сер}$ – середньодобова температура найхолоднішого місяця року, °С;

t_{min} – найнижча температура найхолоднішої доби для регіону розміщення приміщення, °С.

Як величину $t_з$ також беруть середню температуру найбільш холодних днів з забезпеченістю 0,92, а для весняних теплиць – середню температуру найбільш холодного місяця за період експлуатації, знижену на половину максимальної добової амплітуди температури повітря.

Тепловтрати з інфільтрацією повітря $P_{інф}$ через нещільності вимагають даних щодо розмірів щілин (довжина і ширина), що на практиці оцінити складно. Крім того, вони залежать від типу конструкції і поточного стану будівельної частини будівлі.

Тепловтрати через ґрунт $P_{гр}$ точно визначити також складно внаслідок труднощів опису картини розтікання теплового поля. Без знання величин $P_{інф}$ і $P_{гр}$ потужність, потрібну для електронагріву парника або теплиці, можна вирахувати лише наближено. Наближатися до високої точності розрахунку немає потреби, тому що розрахунок проводиться для деяких середніх кліматичних умов, тому завдання значно опосередковується.

З емпіричних досліджень відомо, що основна частка тепловтрат (близько 70 %) доводиться на світлопроникну огорожу (скло або плівку), тобто визначається величиною $P_{огор}$ за виразом:

$$P_{об.} = 1{,}43\ K_{скл} \times F_{скл}\ (t_в - t_з), \qquad (3.4)$$

де $F_{скл}$ – площа скління, м^2;

Потужність, Вт, нагрівного елементу

$$P_н = P_{об.} / \eta, \qquad (3.5)$$

де η – ККД електронагрівального пристрою.

Коефіцієнт $K_{скл}$, зведений до площі світлопроникної огорожі залежить від швидкості повітря v та визначається за рис. 3.4.

Якщо пристрій електронагрівання знаходиться у культиваційному приміщенні, тоді $\eta = 1$.

При електричному обігріві ґрунту використовують сталевий дріт, прокладений у ґрунті (при зниженій напрузі 24–60 В) в азбестоцементних або керамічних трубах або нагрівальний провід ПОСХВ, ПОСХВТ, ПНВС тощо.

Прокладений у ґрунті провід захищають від механічних ушкоджень металевою сіткою або укладають у бетонну оболонку.

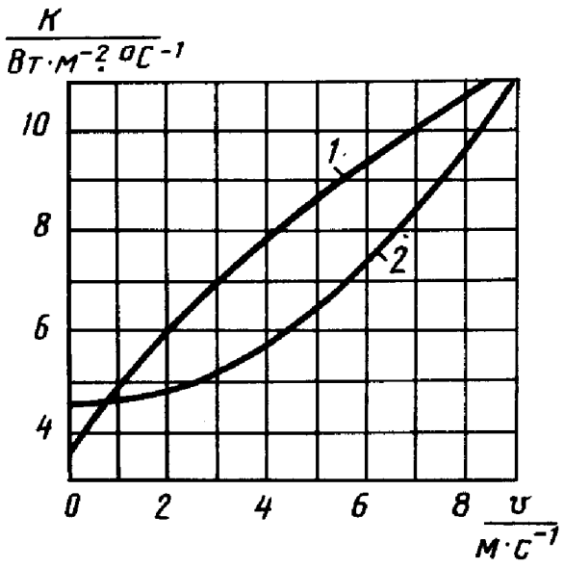


Рисунок 3.4 – Зведений коефіцієнт теплопередачі $К_{огор}$ через скління теплиць (1) і парників (2) при різній швидкості вітру v

У парниках і теплицях найчастіше використовують комбінований (ґрунтово-повітряний) підігрів, тоді розрахункову потужність розподіляють між нагрівачами ґрунту $Р_г$ і повітря $Р_п$ в такому відношенні: для теплиць $Р_г/Р_п$=1 :1 або 1:2, для парників – 1:1 або 2:1.

Для розрахунку нагрівних елементів парників і теплиць використовують експериментальні графіки залежності температури нагрівача від діаметра дроту, сили струму, потужності і напруги дроту довжиною 1 м.

Особливість розрахунку полягає в тому, що довжину **l** нагрівного елемента задаються на початку розрахунку залежно від геометричних розмірів культиваційного приміщення і схеми з’єднання нагрівачів, а діаметр дроту нагрівача розраховують.

Електричний розрахунок ґрунтових нагрівачів. Потужність ґрунтового обігріву як правило задають у діапазоні 30–50 % від загальної потужності.

Розрахунок ґрунтових нагрівачів, прокладених безпосередньо у ґрунті. Ґрунтові нагрівачі виконують зі сталевого дроту, діаметром 4–8 мм. Для живлення застосовують понижувальні трансформатори.

Метою розрахунку є визначення струму у одному проводі нагрівача, кількості нагрівачів і кількості трансформаторів для обігріву.

Для обігріву таким способом застосовують трансформатори ОСУ, ОСЗ, ТС, ТПО тощо з потужністю від 20 до 100 кВА.

Розрахунок ґрунтових нагрівачів, прокладених у керамічних або асбоцементних трубах. При такому обігріві провід можна включати під фазну напругу.

Мета розрахунку – визначити діаметр дроту. Вихідні данні – число нагрівачів, крок укладки, величина напруги, що визначається схемою з'єднання, довжина нагрівача (відрізка проводу включеного під фазну напругу). Питома потужність обирається за розрахованою питомою втратою напруги для обраного діаметра і температури.

Нагрівні елементи з сталевого дроту в азбоцементних або гончарних трубах розраховують, використовуючи графічний метод розв'язання системи рівнянь:

$$\begin{cases} \Theta_{н.е} = f(d); \\ \Theta_{н.е} = \varphi(d), \end{cases} \tag{3.6}$$

де $\Theta_{н.е}$ – температура нагрівного елемента, °С.

Рівняння $\Theta_{н.е} = f(d)$ відображає умови теплообміну нагрівача і записується на основі законів теплопередачі.

Для нагрівача повітря

$$\Theta_{н.е.П} = \Delta\Theta_1 + \Delta\Theta_2 + \Delta\Theta_3 + \Delta\Theta_П, \tag{3.7}$$

де $\Delta\Theta_1$ – температурний перепад між нагрівачем і внутрішньою поверхнею труби, °С;

$\Delta\Theta_2$ – перепад температури в трубі, °С;

$\Delta\Theta_3$ – перепад температури між зовнішньою поверхнею труби і повітрям у парнику, °С;

$\Delta\Theta_П$ – температура повітря у парнику, °С.

Величини $\Delta\Theta_1$ і $\Delta\Theta_3$ як функції лінійної густини потужності P_l і діаметру дроту d і труби D визначають за кривими рис. 3.5 і 3.6.

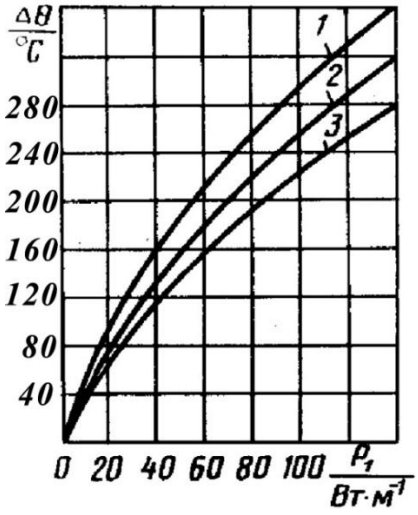


Рисунок 3.5 – Залежність перепаду температури $\Delta\Theta_1$ між нагрівним дротом і внутрішньою поверхнею азбоцементної труби від лінійної густини потужності:

$1 - d = 2мм$; $2 - d = 3мм$; $3 - d = 4мм$

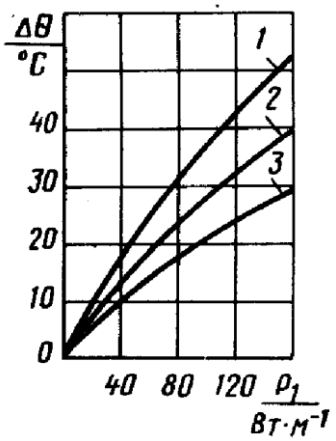


Рисунок 3.6 – Залежність перепаду температури $\Delta\Theta_3$ між зовнішньою поверхнею азбоцементної труби і повітрям від лінійної густини потужності:

$1 - D = 70мм$; $2 - D = 100мм$; $3 - D = 130мм$

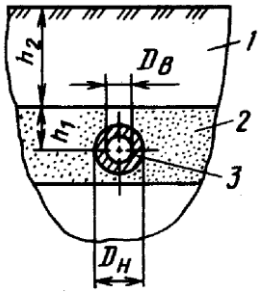


Рисунок 3.7 – Схема розміщення нагрівного елементу ґрунту:

1 – ґрунт; 2 – пісок; 3 – ізоляційна труба

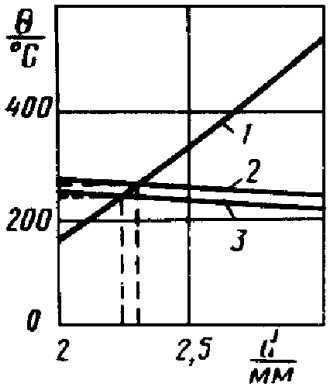


Рисунок 3.8 – Графічне розв'язання системи рівнянь (3.6)
для стального дроту при електрообігріві парників:
$1 - \Theta_{н.е} = \varphi(d)$; $2 - \Theta_{н.е.грунту} = f_2(d)$; $3 - \Theta_{н.е.пов.} = f_1(d)$

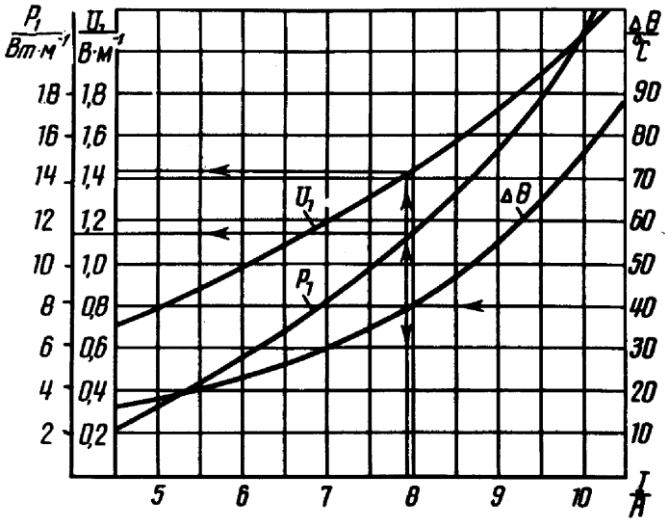


Рисунок 3.9 – Номограма для розрахунку електрообігріву ґрунту у парниках і теплицях нагрівальним проводом

Перепад температури в трубі

$$\Delta\Theta_2 = \frac{P_l}{2\pi\lambda}\ln\left(\frac{D_з}{D_в}\right), \qquad (3.8)$$

де λ – теплопровідність матеріалу труби, Вт/(м^2·°С);

$D_з$ і $D_в$ – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри труби, м.

Для азбоцементних труб діаметром 0,05–0,1 м для спрощеного розрахунку можна брати $\Delta\Theta_2 = 0,06P_l$.

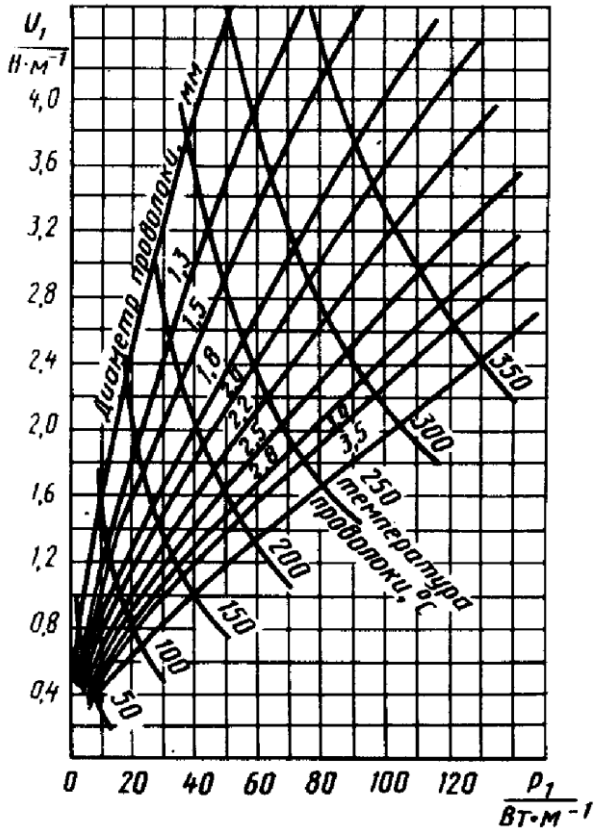


Рисунок 3.10 – Залежність діаметру d та температури $\Theta_{н.е}$ стального дроту від лінійної густини потужності (на 1 м довжини дроту) та лінійної напруги при електрообігріві парників

Для нагрівача ґрунту

$$\Delta\Theta_{н.е.грунту} = \Delta\Theta_1 + \Delta\Theta_2 + \Delta\Theta_{піс} + \Delta\Theta_{гр} + \Theta_{гр}, \qquad (3.9)$$

де $\Delta\Theta_1$ і $\Delta\Theta_2$ − таке саме, що і для повітряного нагрівного елементу;

$\Delta\Theta_{піс}$ – температурний перепад в шарі піску, °С

$$\Delta\Theta_{піс} = 0{,}31 P_l \ln\left[\frac{2h_1}{D} + \sqrt{\left(\frac{2h_1}{D}\right)^2 - 1}\right], \qquad (3.10)$$

$\Delta\Theta_{гр}$ – температурний перепад в шарі ґрунту, °С:

$$\Delta\Theta_{гр} \approx 1{,}1\left(h_2 - h_1\right) P_l, \qquad (3.11)$$

де h_2 і h_1 – товщина шару відповідно піску і ґрунту, м (рис. 3.7);

$\Theta_{гр}$ – температура поверхні ґрунту, °С.

Рівняння $\Theta_{н.е} = \varphi(d)$ отримане з виразу для електричного опору сталевого дроту довжиною 1 м, діаметром d при робочій температурі $\Theta_{н.е}$, характеризує залежність температури дроту від діаметру, потужності і напруги. Наприклад, при $\rho_{20} = 0{,}13 \cdot 10^{-6} Ом \cdot м$, $\alpha_R = 0{,}0045° C^{-1}$ і $\cos\varphi = 0{,}93$ маємо:

$$\Theta_{н.е} = 222\left(5{,}4 \cdot 10^{6} \frac{U_l^2 d^2}{k_R P_l} - 1\right) + 20,$$

де $U_l = U / l_{н.е}$ – потужність дроту довжиною 1 м, Вт/м;

d – діаметр дроту м;

k_R – відношення опору сталевого дроту при змінній напрузі до опору сталевого дроту при постійній напрузі і такій самій температурі; $k_R = 1 + 0{,}0176 d^{2,2}$;

$P_l = P_{н.е} / l_{н.е}$ – потужність, що виділяється дротом довжиною 1 м (питома лінійна потужність), Вт/м;

U – напруга, яка підводиться до нагрівного елементу, В;

$l_{н.е}$ – довжина нагрівного елементу, м;

$P_{н.е}$ – потужність нагрівного елементу, Вт.

Методом спільного графічного розв’язання системи рівнянь (3.6) визначають діаметр і температуру дроту, яка не повинна перевищувати 300 °С.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 3

1 Які технологічні задачі вирішує електрообігрів ґрунту в закритому ґрунті?

2 Які способи електрообігріву ґрунту розглядаються?

3 Які вихідні дані потрібні для розрахунку системи обігріву ґрунту?

4 Як впливає вологість ґрунту на ефективність обігріву та теплоперенесення?

5 У чому різниця між обігрівом ґрунту і обігрівом повітря в теплиці з точки зору енергоефективності?

6 Які вимоги до монтажу та електробезпеки нагрівальних елементів у ґрунті?

7 Поясніть принципову схему системи (за рис. 3.1): які елементи керування та захисту застосовують?

8 Які режими обігріву доцільні для різних культур?

9 Які типові відмови систем електрообігріву ґрунту та методи їх діагностики?

10 Як оцінити економічну доцільність електрообігріву ґрунту порівняно з альтернативами?

Тема 4. ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ В РОСЛИННИЦТВІ. УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА ЗБЕРІГАННЯ ПРОДУКЦІЇ

План

4.1 Електротеплова обробка сільськогосподарської продукції

4.2 Теплова обробка продуктів

4.1 Електротеплова обробка сільськогосподарської продукції

Одержання тепла при перетворенні електричній енергії застосовується для сушіння, обробки кормів із метою підвищення їх якості, знищення вмісту насіння бур'янів, придушення життєдіяльності бактерій (пастеризація) тощо. Застосування тепла у процесах оброблення продуктів рослинництва можна розділити на 3 види:

1) ***сушіння*** – зневоднення сільськогосподарських продуктів з метою збільшення їх тривалості зберігання. Сушіння за домінуючим способом перенесення тепла поділяють на кондуктивне (за рахунок теплопровідності і дифузії вологи), конвективне і терморадиаційне. Для всіх цих видів сушіння застосовують електричні методи. Ці методи (електричні) відрізняються лише ***способом одержання тепла***. У сільськогосподарському виробництві основне значення має сушіння зерна, особливо насіннєвого матеріалу. Процес сушіння з використанням електроенергії достатньо енерговитратний (питоме енергоспоживання залежно від виду процесу складає: для конвективного сушіння – 1,5–2 кВт·год/кг продукту, терморадіаційне – 1,5–2,5 кВт·год/кг продукту, високочастотне – 2,0–3,5 кВт·год/кг продукту). Тому цей вид сушіння комбінують з іншими, наприклад, сушіння зі спалюванням палива. З метою отримання найвищого ступеня збереження корисних властивостей (вітаміни, мінерали) продуктів під час їх висушування також застосовують сублімаційне сушіння, яке має найбільші затрати енергії (до 4,5 кВт·год/кг продукту). У зв'язку з цим такий тип сушіння отримав поширення у космічній галузі. Лише сублімаційне сушіння забезпечує низькотемпературний вплив на висушуваний продукт;

2) *теплове оброблення* – поділяється на підігрів до необхідної температури з метою стерилізації і охолодження з метою збільшення терміну зберігання і збереження властивостей продуктів;

3) *забезпечення умов зберігання* – забезпечення оптимального мікроклімату (температура, вологість, газовий склад середовища тощо).

4.1.1 Сушіння продукції рослинництва

Активне вентилювання. Цей спосіб сушіння найбільш ефективний особливо для зерна і сіна.

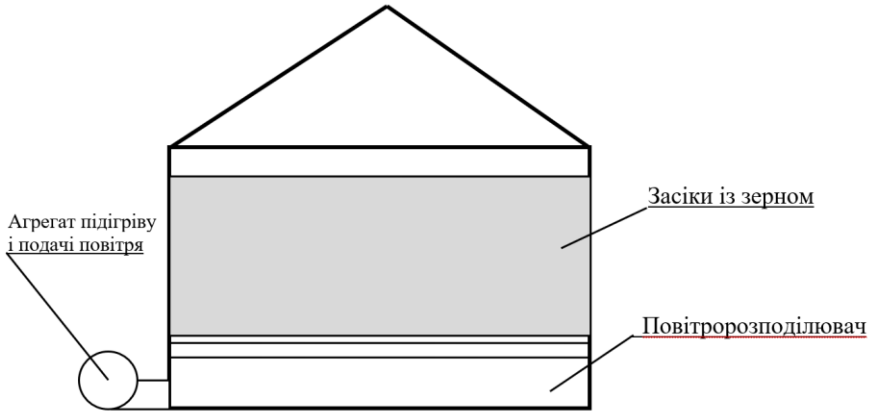


Рисунок 4.1 – Вентилювання зерна в засіках

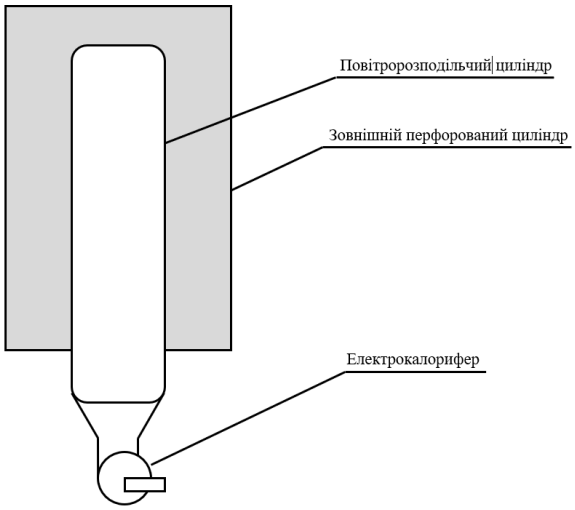


Рисунок 4.2 – Вентильований бункер

Як правило застосовується вентилювання з підігрівом повітря**.** Мета – з метою запобігання самозайманння і для сушіння. Активне вентилювання здійснюють у засіках або спеціальних бункерах.

4.1.2 Електротерморадіаційне сушіння

Це сушіння інфрачервоними променями. Відрізняється великою інтенсивністю підведення енергії (порівняно з конвективним способом), що дозволяє збільшити випаровування вологи усередині матеріалу.

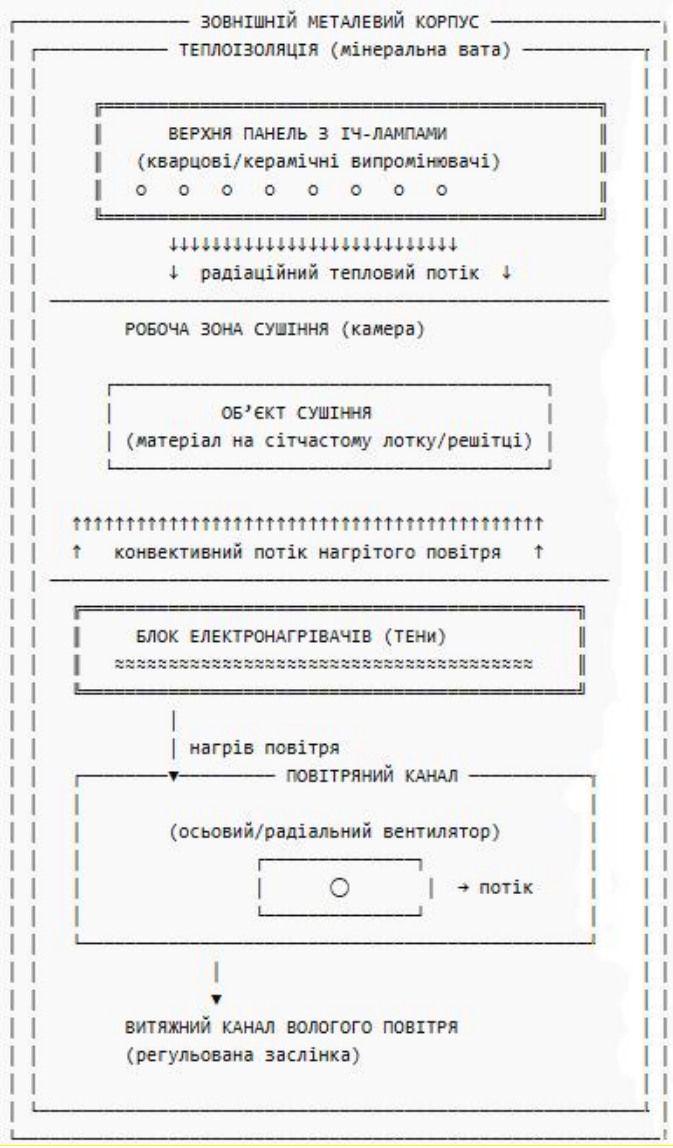


Рисунок 4.3 – Принципова схема електротерморадіаційного сушіння

Особливість схеми:

1) вибірковість до матеріалів (продукт повинен мати велику поглинальну спроможність);

2) обмеженість у глибині проникнення ІЧ-випромінювання. Як джерела променів використовуються як лампи розжарювання, так і темні (ТЕНи) випромінювані.

Переваги схеми: безінерційність.

Недоліки схеми: малий термін служби випромінювачів.

4.1.3 Високочастотне сушіння

Принципова схема високочастотного сушіння зерна подана на рис. 4.4.

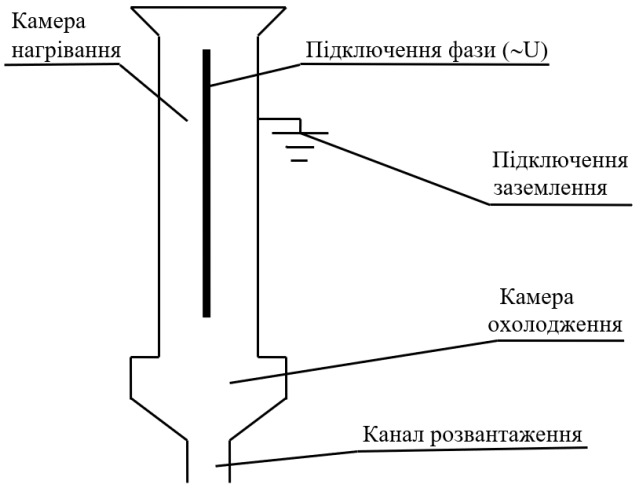


Рисунок 4.4 – Принципова схема високочастотного сушіння зерна

Порівняно з конвективним і термогравітаційним сушінням високочастотне сушіння має перевагу, яка дозволяє прогрівати матеріал на всю глибину (об'ємно), що дозволяє не перегрівати його, збільшити швидкість виходу вологи, зменшити псування продукту за рахунок його перегрівання у поверхневих шарах. Це відбувається за рахунок рівномірного прогрівання у всьому об'ємі продукту.

4.2 Теплова обробка продуктів

4.2.1 Електрична пастеризація

Електрична пастеризація переважно застосовується для придушення розвитку мікрофлори молока з метою запобігання процесів шумування. Вона полягає у процесі підігріву продукту до температури 65–85 °С та подальшої витримки до 30 хв із наступним охолодженням. Електричні методи одержання тепла знайшли застосування при пастеризації, високочастотній пастеризації та інфрачервоній пастеризації, які забезпечили процес ультрапастеризації.

1) Електродна пастеризація – найбільш проста і дешева технлогія.

Недоліки – відкладення на електродах солей (молочний камінь), зміна хімічного складу молока.

2) Високочастотна пастеризація

Переваги – швидкодія, рівномірне прогрівання, мінімальна зміна хімічного складу.

Недолік – висока собівартість процесу.

3) Інфрачервоні пастеризатори

Перевага – швидкий прогрів (у тонкому прошарку), зменшення кількості мікроорганізмів, термін цілості збільшується в 1,5 разу.

4.2.2 Електротеплова обробка кормів

Корми піддаються елекротепловому обробленню з метою підвищення їх біологічної доступності поживних речовин тваринами. Використовується як елементний струм, так і електродне нагрівання. Переважно електричним методом запарюють картоплю і роблять електротермічну обробку соломи. Елементний спосіб полягає у одержанні тепла у нагрівачі з передачею тепла продукту (при електродному – тепло передається у продукт).

Принцип дії і розрахунок електродних і елементних запарників кормів не відрізняється від аналогів при нагріванні води.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 4

1 Які основні цілі термообробки та зберігання с.-г. продукції з позицій якості й безпечності?

2 Чим відрізняються режими підігріву, сушіння та термостабілізації продукції?

3 Які типи сушильних установок розглядаються у темі та за якими ознаками їх класифікують?

4 Які параметри сушіння є ключовими?

5 У чому принципова відмінність ІЧ-нагріву від конвективного сушіння?

6 Які переваги та обмеження НВЧ-обробки продукції?

7 Що зображено на рис. 4.1 і які елементи визначають роботу установки?

8 Що подано в табл. 4.1 та як використовувати ці дані у розрахунку режиму?

9 Які вимоги до енергозбереження та керування режимами в установках термообробки?

10 Які фактори найчастіше погіршують якість продукції під час термообробки?

Тема 5. ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ НА РЕМОНТНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ. ЕЛЕКТРИЧНІ ПЕЧІ

План

5.1 Номенклатура печей

5.2 Обґрунтування та вибір способу нагріву

5.3 Тепловий та електричний розрахунки печі

5.1 Номенклатура печей

Електронагрівання у ремонтному виробництві застосовується для: нагрівання деталей і інструменту під час термічної обробки або пайки, зварювання, нагріванні заготовок перед механічним обробленням, механізації, наплавленні поверхонь тощо.

Рисунок 5.1 – Електрична муфельна піч СНО 4/900

5.1 Номенклатура печей

Використовуються в основному для загартування виробів. Найбільше поширені камерні печі. Типові позначення електричних печей:

Перша буква позначає – метод нагрівання **С** – опором

Друга буква визначає конструкцію печі; **Н** – камера; **Ш** – шахтна; **К** – конвеєрна; **Б** – барабана; **Т** – штовхальна; **Р** – рольчангова; **В** – ванна; **П** – протяжна; **Е –** елеваторна і т.д.

Третя буква позначає характер середовища: **О** – окисна (звичайна атмосфера); **З** – захисна; **Ц** – цементаційний газ; **С** – сіль і луг; **А** – агресивне середовище; **К** – наявність компресії (незначно стиснене середовище).

У наступних цифрах вказується у чисельнику розмір робочого простору у дециметрах кубічних, а у знаменнику – температура печі у градусах Цельсія.

5.2 Обґрунтування та вибір способу нагріву

На ремонтних підприємствах найчастіше використовують камерні печі, шахтні печі і електричні соляні ванни.

5.2.1 Камерні печі

Коротка характеристика. Камерні печі – це термічні агрегати періодичної дії з горизонтальною робочою камерою, в якій вироби розміщують на подах, піддонах або в кошиках. Нагрів здійснюється електронагрівачами або газовими пальниками, розташованими по периметру камери.

Принцип дії. Після завантаження виробів камера герметизується, вмикається система нагріву, і тепло передається до виробів переважно конвекцією та випромінюванням. Температурний режим підтримується автоматикою керування.

Особливості роботи:

- періодичний режим (завантаження – нагрівання – витримка – охолодження – розвантаження);
- можливість роботи в повітряному або захисному середовищі;
- гнучкість щодо номенклатури та габаритів виробів.

Переваги:

- універсальність застосування;
- простота конструкції та обслуговування;
- можливість обробки виробів різної форми і маси.

Недоліки:

- нерівномірність температурного поля при великих завантаженнях;
- вищі тепловтрати порівняно з безперервними агрегатами;
- менша продуктивність у масовому виробництві.

Типові виробництва. Ремонтні та машинобудівні підприємства, термічні ділянки цехів, інструментальні виробництва, де потрібна універсальність (відпуск, нормалізація, сушіння ізоляційних матеріалів, термообробка вузлів після ремонту).

5.2.2 Шахтні печі

Коротка характеристика. Шахтні печі – вертикальні термічні агрегати з глибокою робочою шахтою, призначені для нагріву довгомірних або масивних виробів у підвішеному чи опорному положенні.

Принцип дії. Вироби завантажують зверху в шахту; нагрів здійснюється електронагрівачами або пальниками, розміщеними вздовж стінок. Теплопередача відбувається конвекцією і випромінюванням у вертикальному об’ємі, що забезпечує більш рівномірний прогрів по висоті виробу.

Особливості роботи:

- вертикальне розміщення виробів (вали, ротори, штоки, колони);
- зменшення викривлення довгомірних деталей завдяки симетричному нагріву;
- зручність організації зонального температурного режиму по висоті.

Переваги:

- рівномірність нагріву довгомірних і масивних деталей;
- менші деформації виробів;
- раціональне використання виробничої площі за рахунок вертикальної компоновки.

Недоліки:

- обмежена універсальність для дрібних і плоских виробів;
- складніші завантажувально-розвантажувальні операції (потрібні підйомні механізми);
- підвищені вимоги до теплоізоляції та герметизації верхньої кришки.

Типові виробництва. Ремонтні підприємства енергетичного та машинобудівного профілю (термообробка валів, роторів, великих штампів), металургійні та важкі механоскладальні виробництва.

5.2.3 Електричні соляні ванни

Коротка характеристика. Електричні соляні ванни – це печі, в яких нагрів виробів здійснюється зануренням у розплавлену соляну суміш (нітрати, хлориди тощо), що слугує теплоносієм і забезпечує інтенсивний теплообмін.

Принцип дії. Сольова суміш нагрівається електричними нагрівачами до заданої температури і переходить у розплав. Виріб занурюють у розплав, де відбувається швидке і рівномірне нагрівання за рахунок безпосереднього контакту з теплоносієм.

Особливості роботи:

- дуже інтенсивний теплообмін і висока швидкість нагріву;
- можливість точного підтримання температури та локальних режимів;
- необхідність контролю складу соляного розплаву і заходів безпеки.

Переваги:

- висока рівномірність температури по перетину виробу;
- мінімальне окиснення поверхні при правильному підборі солей;
- компактність і висока точність термічних режимів.

Недоліки:

- підвищені вимоги до безпеки (робота з розплавами);
- корозійний вплив солей на обладнання;
- обмеження за габаритами виробів, що можна занурити.

Типові виробництва. Інструментальні та ремонтні підприємства для гартування, відпуску, ціанування, термообробки ріжучого інструменту, дрібних і середніх деталей із підвищеними вимогами до рівномірності нагріву.

5.3 Тепловий та електричний розрахунки печі

5.3.1 Визначення корисної потужність

5.3.1.1 Маса стержнів

$$m = n \cdot \gamma \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l, \qquad (5.1)$$

де n – кількість деталей;

γ – густина сталі,

d – діаметр деталі, дм;

l – довжина деталі, м.

5.3.1.2 Кількість теплової енергії, необхідної для нагрівання деталей

$$Q = c \cdot m \cdot \left(t_k - t_н\right), \tag{5.2}$$

де c – теплоємкість сталі. кДж/$\left(кг.^{o} C\right)$

t_k – кінцева температура, °С;

$t_н$ – початкова температура. °С.

5.3.1.3 Визначення корисної потужності

$$P_{ПОЛ} = \frac{Q}{3600 \cdot \tau} \tag{5.3}$$

5.3.2 Розрахунок теплових втрат

5.3.2.1 Зовнішня поверхня печі

$$F_Н = 2\left(b_1 \cdot c_1 + a_{1\cdot} \cdot c_1 + b_1 \cdot a_1\right). \tag{5.4}$$

5.3.2.2 Зовнішня поверхня шамотової кладки

$$F_Ш = 2\left(a_2 b_2 + c_2 b_2 + a_2 c_2\right). \tag{5.5}$$

5.3.2.3 Внутрішня поверхня печі

$$F_В = 2\left(a_3 \cdot b_3 + b_3 \cdot c_3 + c_3 \cdot a_3\right). \tag{5.6}$$

5.3.2.4 Середня поверхня шамотової кладки

$$F_{СР.Ш} = \sqrt{\left(F_Ш \cdot F_В\right)}. \tag{5.7}$$

5.3.2.5 Середня поверхня вермикулітової засипки

$$F_{СР.В} = \sqrt{F_{Ш} \cdot F_{Н}}\,. \qquad (5.8)$$

5.3.2.6 Теплові втрати печі

$$P_{ПОТ} = \frac{t_К - t_Н}{\frac{1}{\alpha_Н \cdot F_Н} + \frac{\delta_Ш}{\lambda_Ш \cdot F_{СР.Ш}} + \frac{\delta_В}{\lambda_В \cdot F_{СР.В}} + \frac{1}{\alpha_В \cdot F_В}}, \qquad (5.9)$$

де $\alpha_н$=12 Вт/(м^2 ^{o}С); для кам'яних та металевих стін при t = 40–60 °С;

$\lambda_В$ – теплопровідність вермикуліту;

$\lambda_Ш$ – теплопровідність шамоту;

$\delta_Ш$ – товщина ізоляції шамотної цегли;

$\delta_В$ – товщина ізоляції вермикулітової засипки.

5.3.2.7 Потужність, яка необхідна для нагрівання деталей у стаціонарному режимі

$$P = P_{ПОЛ} + P_{ПОТ}\,. \qquad (5.10)$$

5.3.3. Розрахунок температури зовнішньої стінки печі

5.3.3.1 Температура між шарами

$$t_{СЛ} = t_К - P_{ПОТ} \cdot \frac{\delta_Ш}{\lambda_Ш \cdot F_{СР.Ш}}\,. \qquad (5.11)$$

Умова $t_{СЛ} < t_{ДОП}$ для ізоляції.

5.3.3.2 Температура зовнішньої стінки печі

$$t_{СТ} = t_Н + \frac{P_{ПОТ}}{\alpha_Н \cdot F_Н}. \qquad (5.12)$$

5.3.4. Розрахунок додаткових втрат при нагріванні холодної печі (періодичний режим).

5.3.4.1 Середня температура шамотової кладки

$$t_{СР.Ш} = \frac{t_К + t_{СЛ}}{2}. \quad (5.13)$$

5.3.4.2 Середня температура вермикуліту

$$t_{СТ.В} = \frac{t_{СТ} + t_{СЛ}}{2}. \quad (5.14)$$

5.3.4.3 Кількість теплової енергії для нагрівання шамотової кладки

$$Q_Ш = c_Ш \cdot m_Ш (t_{СР.Ш} - t_Н). \quad (5.15)$$

де $C_Ш$ – теплоємкість шамоту;

$m_Ш$ – маса шамоту;

$$m_Ш = j_Ш \cdot F_{СР.Ш} \cdot \delta_Ш$$

де $j_Ш$ – густина шамоту.

5.3.4.4 Кількість теплової енергії, яка необхідна для нагрівання вермикулітової засипки

$$Q_В = c_В \cdot m_В (t_{СР.В} - t_Н). \quad (5.16)$$

де $C_В$ – теплоємкість вермикуліту, кДж/(кг.°С);

$m_В$ – маса вермикуліту, кг;

$j_В$ – густина вермикуліту, кг/дм^3

$$m_В = j_В \cdot F_{СР.В} \cdot \delta_В,$$

де $\delta_В$ – товщина вермикуліту.

5.3.4.5 Кількість теплової енергії, яка необхідна для нагрівання жароміцних виробів

$$Q_Ж = c_Ж \cdot m_Ж (t_К - t_Н), \quad (5.17)$$

де $C_Ж$ – теплоємкість жароміцних виробів.

5.3.4.6 Сумарна кількість теплової енергії, яка необхідна для нагрівання конструкції печі

$$\sum Q_{КОНСТР} = Q_{Ш} + Q_{В} + Q_{Ж}\,, \tag{5.18}$$

5.3.4.7 Визначення тривалості нагрівання печі потужністю P, кВт

$$\tau = \frac{\sum Q_{КОНСТР.}}{3600\left(P - \frac{P_{ПОТ}}{2}\right)}\,. \tag{5.19}$$

5.3.4.8 Визначення теплового ККД

$$\eta = \frac{P_{ПОЛ}}{P}\,. \tag{5.20}$$

5.3.5 Розрахунок нагрівачів для печі

Вибір матеріалу нагрівача

5.3.5.1 Потужність фази нагрівача

$$P_{Н} = \frac{P}{m \cdot n}. \tag{5.21}$$

де m – кількість фаз;

n – кількість нагрівачів на одну фазу.

5.3.5.2 Електричний струм нагрівача

$$I_{Н} = \frac{P_{Н} \cdot 10^{3}}{U_{Н}}, \tag{5.22}$$

де $U_{Н}$ – напруга, яку прикладено до нагрівача, В.

5.3.5.3 Вибір перерізу проводу S, який визначають, задавшись діаметром d дроту зі стандартного ряду:

0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9;

1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4;...

$$S = 0,785d^2.$$

5.3.5.4 Визначення фактичної температури

$$t_Ф = \frac{t_P}{K_M \cdot K_C}, \quad (1.23)$$

де K_M – коефіцієнт, який враховує умови монтажу проводу;

K_C – коефіцієнт, який враховує умови середовища навколо проводу.

Для нормальної роботи нагрівача

$$t_Ф < t_{ДОП},$$

де $t_{ДОП}$ – допустима робоча температура матеріалу нагрівача.

5.3.5.4.1 Довжина проволоки на один нагрівальний елемент

$$l_H = \frac{U_H \cdot S}{I_{H\cdot} \cdot \rho_t}, \quad (5.24)$$

де ρ_t – питомий електричний опір матеріалу ніхромової проволоки при фактичній температурі $t_Ф$

$$\rho_t = \rho_{20}\left\lfloor 1+\alpha\left(t_Ф - 20\right)\right\rfloor, \quad (5.25)$$

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

5.3.5.4.2 Термін служби нагрівача

$$\tau = \tau^{|} \cdot \kappa^{|} \cdot d,$$

де $\kappa^{/}$ – коефіцієнт, який враховує форму перерізу нагрівача; для круглої проволоки $\kappa^{/} = 1$;

$\tau^{/}$ – термін служби нагрівача із проволоки діаметром 1 мм;

d – діаметр проволоки, мм.

5.3.5.4.3 Діаметр спіралі – задають конструктивно. Як правило,

$$Д_{СП} \geq 2{,}5d\,.$$

5.3.5.4.4 Задаються кроком спіралі:

$h = 2 \cdot d$ при d≥3мм;

$h = 3 \cdot d$ при d≤3мм.

5.3.5.4.5 Кількість витків спіралі

$$W = \frac{l_H \cdot 10^3}{\sqrt{(\pi \cdot Д_{СП})^2 + h^2}}. \qquad (5.26)$$

5.3.5.4.6 Довжина спіралі

$$l_{СП} = W \cdot h\,.$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 5

1 Які основні типи електричних печей застосовують у АПВ та ремонтній практиці?

2 Які елементи конструкції печі найбільше впливають на ККД і рівномірність температурного поля?

3 У чому відмінність між камерними, шахтними печами та соляними ваннами?

4 Які нагрівальні елементи застосовують у печах і від чого залежить їх ресурс?

5 Які задачі вирішують ВЧ електротехнологічні установки?

6 Поясніть принцип діелектричного нагрівання у ВЧ-полі.

7 Що відображено на рис. 5.1 і які основні вузли установки можна ідентифікувати?

8 Які вимоги безпеки специфічні для ВЧ-установок?

9 Які критерії вибору ВЧ-установки для конкретного продукту?

10 Які причини нерівномірного нагрівання у ВЧ-установках і як їх зменшити?

Тема 6. ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ НА РЕМОНТНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

План

6.1 Природа та властивості електричної дуги

6.2 Джерела живлення

6.3 Технічні характеристики джерел живлення

6.4 Зварювальні трансформатори, зварювальні генератори

6.5 Осцилятори

6.1 Природа та властивості електричної дуги

Електрична дуга – самостійний розряд у газах або парах металів, що характеризується високою щільністю струму і низьким значенням катодного падіння напруги (**10–20 В**).

У звичайних умовах газ не проводить електричний струм. У дузі носіями зарядів є електрони, які виникають при автоелектронній і термоелектронній емісіях на катоді. Іони виникають у результаті термічної й електричної іонізації.

Електрична дуга є самостійним розрядом, тому що вона відбувається за рахунок енергії джерела струму.

Процес запалювання дуги відбувається так:

– у момент доторкання електроду відбувається коротке замикання і виділення теплової енергії у місці контакту, у результаті чого електрод плавиться і випаровується;

– при відведенні електроду розплавлений метал витягується і стоншується, у результаті чого опір зростає і збільшується тепловиділення;

– при подальшому збільшенні міжелектродного проміжку відбувається подальше випаровування металу і іонізація газу.

– іони, розганяючись в електричному полі, потрапляють на електроди і передають їм свою кінетичну енергію, розігріваючи їх.

У зв’язку з тим, що електрони, відриваючись від катоду (–), набувають енергії (робота виходу електрона), то енергія позитивних іонів (аноду) буде

більшою ніж енергія позитивних (катоду), а тому ***температура анода буде більшою ніж температура катода***.

При горінні дуги на аноді (+) утворюється ***кратер*** а на катоді (–) – ***виступ***.

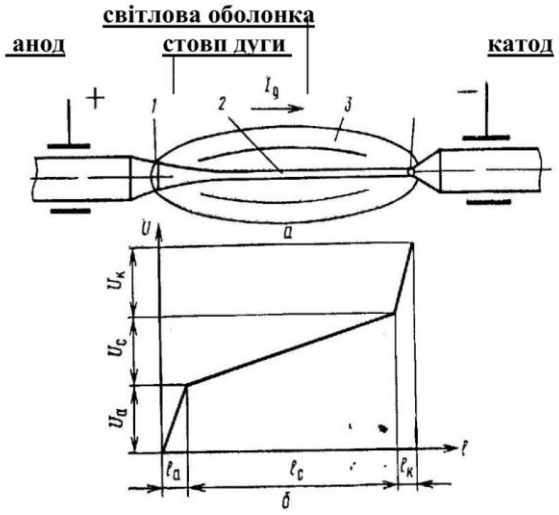


Рисунок 6.1 – Розподіл потенціалу в електричному розряді:
а – електрична дуга постійного струму; б – розподіл напруги на елементах дуги;
1 – анодний кратер; 2 – стовп дуги; 3 – світлова оболонка; 4 – катодна пляма.
$U_а$, $U_с$, $U_к$ - відповідно, анодне падіння напруги, в області дуги, в катодній області; **$L_а$, $L_с$, $L_к$** – відповідно, довжини анодної (**10 мкм**), дугової та катодної (**1 мкм**) областей

Дуга являє собою газовий провідник, що може змінювати свою форму в залежності від сторонніх чинників (магнітне поле тощо) і струму дуги. Залежність напруги дуги від струму ***нелінійна***. Вона складається з **3 зон** струмів**:** малих **1**, середніх **2**, великих **3**.

У 1-ій зоні збільшення струму призводить до зниження напруги, тому що при цьому зростає площа поперечного перерізу стовпа дуги та інтенсифікація процесів іонізації. Це сприяє зростанню електропровідності каналу дугового розряду.

У 2-ій зоні настає рівновага процесів іонізації і де іонізації у розрядному проміжку, площа поперечного перерізу стовпа дуги зростає і напруга її стабілізується, тобто становиться незалежною від значення струму.

У 3-ій зоні зростання струму призводить до зростання напруги на дузі, тому що катодна пляма займає усю площину торців електродів, а опір каналу розряду стабілізується.

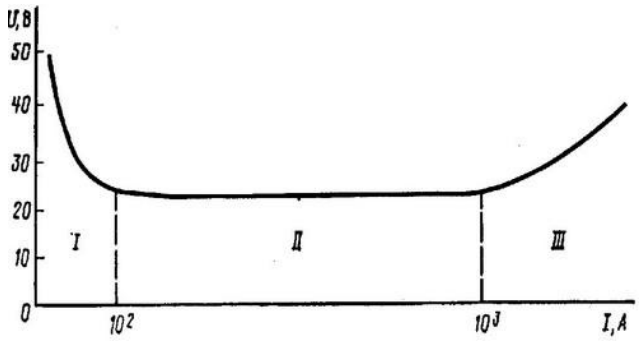


Рисунок 6.2 – Статична ВАХ дуги постійного струму

Розрізняють дугове зварювання на змінному і постійному струмах; плавким і неплавким електродами; ручне, автоматичне і механізоване; відкритою дугою, під шаром флюсу, у захисних газах. Ручне дугове зварювання здійснюється відкритою дугою, яка горить між деталлю і електродом на постійному або змінному струмах.

6.2 Джерела живлення

Джерела струму для живлення зварювальної дуги повинні мати спеціальну зовнішню характеристику. Зовнішньою характеристикою джерела називається залежність напруги на його вихідних клемах від струму електричного ланцюга.

Для ручного дугового зварювання кращі результати дає спадна зовнішня характеристика 1 (рис. 6.3). Напруга між електродом і деталями перед початком зварювання називається напругою холостого ходу $U_{хх}$ (точка А) і дорівнює як правило 60–80 В. Для запалювання дуги електрод торкається деталей, які зварюються. У зварювальному електричному колі виникає коротке замкнення (точка D). Момент запалювання (виникнення) відповідає точці В. Проте такий стан дуги нестабільний, і він швидко переходить у стабільний (точка С), який відповідає власне процесу зварювання та характеризується напругою на дузі $U_д$ та силою зварювального струму $I_{зв}$.

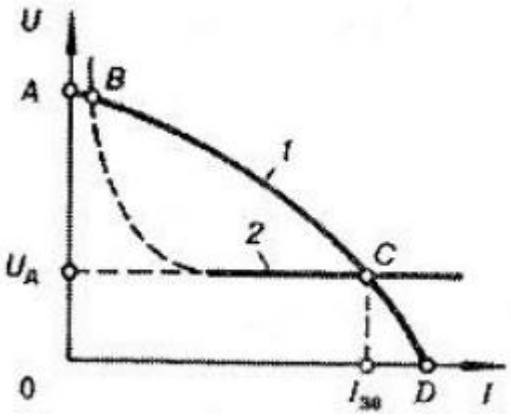


Рисунок 6.3 – Зовнішня характеристика струму (1) і вольт-амперна характеристика дуги (2): А – точка холостого ходу; В – точка запалювання дуги; С – точка стабільного горіння дуги; D – точка короткого замикання

До джерел живлення зварювального струму пред'являють наступні **вимоги**:

– забезпечення ***стійкості*** горіння дуги;

– *стабільність* режиму зварювання**;**

– ***безпека*** роботи**.**

Ці вимоги задовольняються за рахунок таких **параметрів** джерел зварювального струму:

1) ***напруга х.х.***;

2) ***зовнішня*** характеристика;

3) ***засіб регулювання*** зварювального струму.

1) Напруга х.х. повинна бути достатньою для запалювання дуги і безпечною для обслуговуючого персоналу **(50–75 В)**; де **50 В** – ***запалювання*** дуги; **75 В** – умова ***безпеки*** (для зварювальних трансформаторів на **2000 А – Uх. х.≤ 90 В**.

2) Зовнішня характеристика, тобто $U_{дж} = f(I)$, може бути ***круто спадною 1, полого спадною 2, жорсткою 3 і зростаючою 4*** (рис. 6.4).

Дуга і джерело утворюють єдину систему, яка буде знаходитися в ***стійкому стані***, якщо виконується нерівність:

$$(\partial U_{дуг}/\partial I - \partial U_{дж}/\partial I)_{Ір} > 0. \qquad (6.1)$$

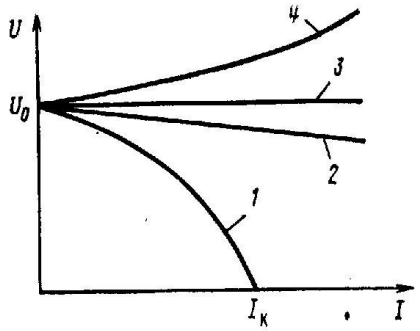


Рисунок 6.4 – Типи зовнішніх характеристик джерел живлення дуги

При жорсткій ВАХ дуги використовується спадна характеристика джерела

При спадній ВАХ використовується більш полога характеристика джерела

При зростаючій ВАХ характеристиці використовується джерело з жорсткою характеристикою

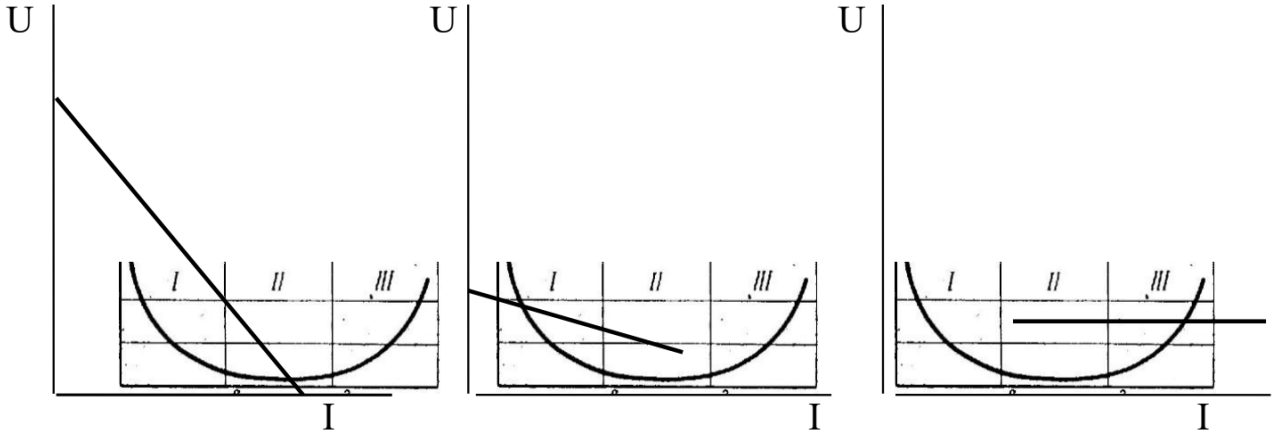


Рисунок 6.5 – Узгодження зовнішніх характеристик дуги і джерела живлення

6.3 Технічні характеристики джерел живлення

Основними технічними характеристиками джерел живлення зварювальної дуги є:

а) ***напруга холостого ходу***;

б) ***номінальна*** напруга;

в) ***номінальне значення*** зварювального струму;

г) ***режим*** роботи.

А) Джерела для **ручного** зварювання виготовляють на струми **125–500 А**, для **механізованого** зварювання на струми **315–1000 А**, для **автоматичного 500–2000 А**. **Багатопостові** джерела мають номінальну силу струму **1000–5000 А.**

Б) Робоча напруга відповідає робочому струму. **Наприклад,** при діапазоні регулювання струму **50–400 А** відповідний діапазон регулювання робочої напруги **22–36 В**.

В) Напруга холостого ходу в джерелах із падаючою характеристикою складає **60–90 В**.

Г) Режим роботи джерел може бути ***перемежованим, повторно-короткочасним і тривалим.***

У ***перемежованому*** режимі робота джерела характеризується відносною **тривалістю навантаження** (робота під навантаженням чергується з х.х.)

$$ПН = t_н / (t_н + t_{х.х}), \quad (6.2)$$

де $t_{х.х}$ – тривалість роботи на холостому ході;

$t_н$ – тривалість роботи під навантаженням.

У ***повторно-короткочасному*** режимі робота джерела характеризується відносною тривалістю вмикань (робота під навантаженням чергується з відключенням від мережі):

$$ПВ = t_н / (t_н + t_о), \quad (6.3)$$

де $t_о$ – час відключення від мережі.

У тривалому режимі джерело постійно працює під навантаженням.

Крім зазначених параметрів у технічній характеристиці джерел зварювального струму вказують ***напругу*** живлячої мережі; номінальну ***потужність***, ***масу***, ***ККД***.

Умовне позначення джерела струму:

Перша буква – означає ***тип*** виробу:

Т – трансформатор;

В – випрямляч;

Г – генератор;

П – перетворювач;

А – агрегат;

У – установка.

Друга буква – означає ***вид*** зварювання:

Д – дугове;

П – плазмове.

Третя **буква** означає ***спосіб*** зварювання:

Ф – під флюсом;

Г – в захисних газах;

У – універсальне джерело для декількох способів; відсутність букви означає ручне зварювання покритими електродами;

Четверта буква пояснює ***призначення*** джерела:

М – багатопостова.

Наступні після букв у позначенні цифри використовують для позначення номінального ***струму*** (округленні кратно 100 А), ще **2** цифри – ***номер*** виробу.

У кінці вказують ***кліматичне*** виконання і ***категорію*** розміщення.

6.4 Зварювальні трансформатори, зварювальні генератори

6.4.1 Зварювальні трансформатори

Вони одержали дуже широке застосування та виконують такі функції:

– ***розділяють*** силову мережу і зварювальне коло;

– ***знижують напругу*** мережі до напруга необхідної для зварювання;

– ***формують*** необхідні зовнішні характеристики;

– ***забезпечують*** регулювання зварювального струму.

Залежно від способу формування зовнішніх характеристик і регулювання режиму зварювання трансформатори бувають із ***механічним*** і ***електричним*** регулюванням.

Спадна зовнішня характеристика утворюється у зварювальному трансформаторі завдяки великому ***потоку розсіювання*** (рис. 6.5). Для цього первинну і вторинну обмотки розташовують на значній відстані одна від одної. При навантаженні частина магнітного потоку трансформатора замикається по повітрю, створюючи потік розсіювання $\mathbf{Ф_р}$.

$$\Phi_1=\Phi_p+\Phi_2.$$

Зі збільшенням навантаження збільшується потік розсіювання, а тому зменшується ЕРС вторинної обмотки.

Силу зварювального струму можна регулювати ***зміною напруги х.х***. або ***індуктивного опору*** трансформатора.

Регулювання зварювального струму

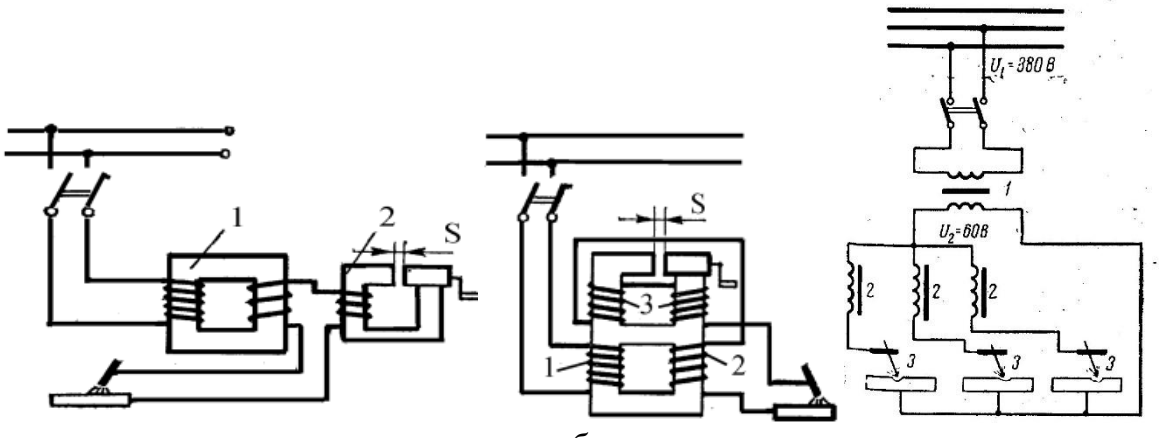
Регулювання зварювального струму можливо:

1) ***переключенням*** витків обмоток (1 або 2 -ої) лише ступенево;

2) у трансформаторах із рухомими котушками силу струму змінюють ***пересуванням рухомої обмотки*** (змінюється потік розсіювання) збільшується зазор, збільшується індуктивний опір;

3) при введенні ***магнітного шунту*** зменшується магнітний опір потоку розсіювання, а самий потік збільшується. Потік можна також при цьому змінювати створивши у шунті постійне підмагнічування.

Створити круто спадну характеристику можна також введенням дроселя або активного опору у коло зварювального струму. Зі ***збільшенням зазору*** зменшується індуктивний опір, тому струм зростає. Крім цього дросель забезпечує спадну характеристику.



а *б* *в*

Рисунок 6.6 – Схеми одиночного (а, б) та багатопостового (в) способу зварювання

У тиристорних трансформаторах формування зовнішніх характеристик і регулювання режиму зварювання здійснюється ***напівкерованими*** вентилями –

тиристорами, що включаються ***зустрічно-паралельно*** і ***системою*** керування фазою їх вмикання.

Спосіб ***фазового регулювання*** змінного струму заснований на перетворенні синусоїдального струму на змінні імпульси, амплітуда і тривалість яких визначаються кутом (фазою) вмикання тиристорів.

Зварювальні трансформатори можуть бути ***1-фазні, 3-фазні*** (рис. 6.6).

Найбільш просту схему мають зварювальні трансформатори з окремим дроселем. Тип ЗТЕ, що складається з трансформатора 1 і дроселя 2, включеного послідовно в зварювальний ланцюг (рис. 6.6 а). Трансформатор знижує напругу мережі до напруги холостого ходу (60–80 В), а ***дросель***, що має підвищений індуктивний опір, ***служить для одержання спадної зовнішньої характеристики***. При проходженні змінного струму через обмотку дроселя у ній збуджуються сили самоіндукції, спрямовані протилежно основному струмові. У результаті падіння напруги на дроселі джерело зварювального струму одержує спадну вольт-амперну характеристику.

Дросель призначений також для плавного регулювання зварювального струму шляхом зміни повітряного проміжку в його осерді. Так, наприклад, зі збільшенням повітряного проміжку індуктивний опір дроселя зменшується, а зварювальний струм збільшується.

Подібний принцип дії має зварювальний трансформатор з дроселем, конструктивно об’єднаним в одне ціле зі знижувальним трансформатором. Це трансформатори типу ЗТН, ЗТАН, ЗТ і ТЗД.

Широко застосовуються трансформатори зі збільшеним розсіюванням і рухливою вторинною обмоткою (типу ТЗ і ТД). У цих трансформаторах первинна 1 і вторинна 2 обмотки розсунуті щодо один одного, що обумовлює їх підвищений індуктивний опір внаслідок появи магнітних потоків розсіювання.

При роботі трансформатора основний магнітний потік Φ_o, який утворюється первинною і вторинною обмотками, замикається через залізне осердя (рис. 6.6 б). Частина магнітного потоку відгалужується і замикається навколо обмоток через повітряний простір, створюючи потоки Φ_1 і Φ_2. Потоки розсіювання індукують у обмотках ЕРС, протилежну основній напрузі. Зі збільшенням

зварювального струму збільшуються потоки розсіювання і отже, зростає індуктивний опір вторинної обмотки, що й створює зовнішню спадну характеристику трансформатора. Для плавного регулювання зварювального струму змінюють відстань між обмотками трансформатора. При зближенні обмоток відбувається часткове взаємне знищення протилежно спрямованих потоків розсіювання Φ_1 і Φ_2, що зменшує індуктивний опір вторинної обмотки і збільшує зварювальний потік.

Дуже зручним джерелом струму є зварювальний випрямляч (рис. 6.7). Зварювальний випрямляч складається з трифазного знижувального трансформатора 1, блока кремнієвих випрямлячів 2 і дроселя 3.

Дросель служить для одержання спадної зовнішньої характеристики. Зварювальні випрямлячі забезпечують стабільність горіння дуги, прості і надійні в експлуатації, безшумні.

Для запобігання перегрівання напівпровідників їх охолоджують вентиляторами.

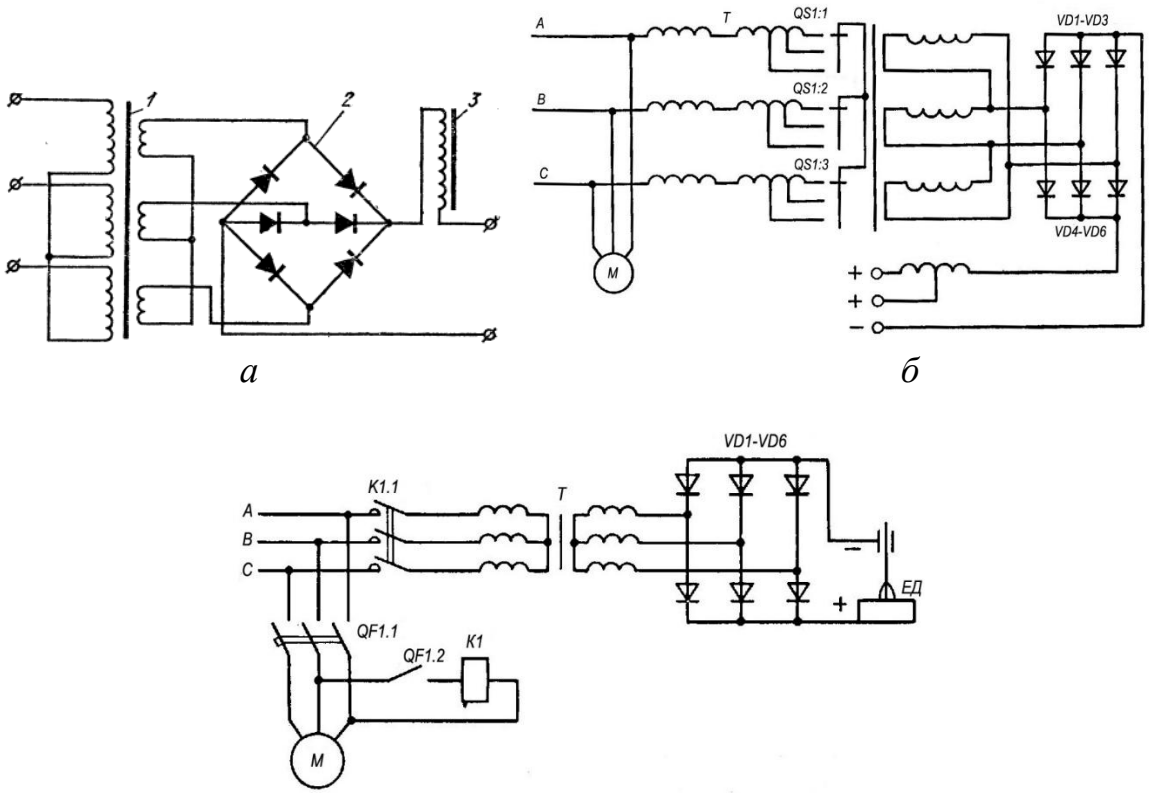


Рисунок 6.7 – Схеми електрозварювальних трансформаторів із випрямлячами

6.4.2 Зварювальні генератори

При зварюванні постійним струмом найбільш часто застосовуваним є генератор постійного струму із самозбудженням, схема якого подана на рис. 6.8.

Зварювальний струм може бути одержаний від генератора.

Магнітний потік збудження створюється за рахунок незалежного джерела (або від самого генератора). Обмотка $\mathbf{W_p}$ може створювати або розмагнічувальний, або намагнічувальний потік, який створюється зварювальним струмом. Це дає можливість одержувати різноманітні зовнішні характеристики джерела (рис. 6.8).

Генератор містить у собі якір 1, який починає обертатися від електродвигуна або від двигуна внутрішнього згоряння, що намагнічує обмотку 2 і розмагнічує обмотку 3, включену послідовно в ланцюг зварювального струму. При цьому потік $\Phi_н$, що намагнічує, не залежить від навантаження, а потік $\Phi_р$, що розмагнічує, зростає зі збільшенням зварювального струму. У результаті взаємодії магнітних потоків генератор має спадну зовнішню вольт-амперну характеристику. Зварювальний струм регулюють грубо секціонуванням витків обмотки 3 або зсувом щіток по колектору. Плавне регулювання здійснюється за допомогою реостата R в ланцюзі намагнічувальної обмотки 2.

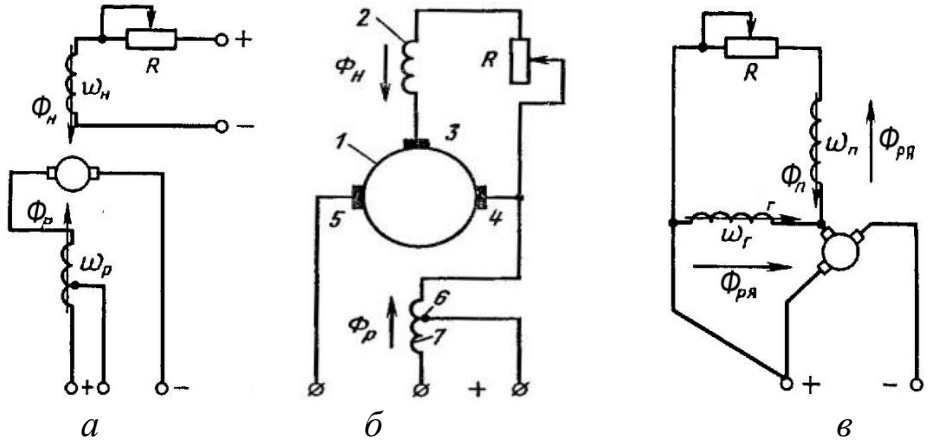


Рисунок 6.8 – Схеми генераторів зварювального струму:
а – з незалежним збудженням; б – з самозбудженням;
в – з розщепленими полюсами

6.4.3 Електроди для зварювання

Як електроди використовують сталеві стрижні з обмазкою. Призначення обмазки (суцільна хімічна суміш):

– ***зменшити*** енергію виходу електронів;

– ***стабілізувати*** процес горіння дуги;

– ***захистити*** прошарок розплавленого металу від окислювання;

– ***захистити*** метал від швидкого охолодження.

На практиці встановлені ***співвідношення*** товщини матеріалів і діаметрів електродів, що подані у табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Товщина деталі, мм	1,5	2	3	4–5	6–8	9–12	13–15	16–20	> 20
Діаметр електрода, мм	1,6	2	3	3–4	4	4–5	5	5–6	8–10

Сила зварювального струму підбирається за формулою К.К. Хренова

$$I_{зв} = (20 + 6d)\, d, \qquad (6.4)$$

де $I_{зв}$ – струм, А; d – діаметр, мм.

При товщині менше **1,5d** – струм ***зменшують*** на **10–15 %;** при товщині більш **3d** – ***збільшують*** на **10–15 %.**

6.5 Осцилятори

Осцилятори застосовуються **для стабілізації** горіння дуги.

Напруга на конденсаторі **С1** зростає до напруги пробою розрядника **Р** конденсатор розряджаючись через індуктивність **L1** створює імпульс напруги на котушці **L2**. Частота коливань залежить від **L2 і С2**

$$\Omega = \sqrt{1/(LC)}\,. \qquad (6.5)$$

Потужність осциляторів складає **15–20 Вт**, напруга **2500–10000 В**, частота **150–500 Гц**.

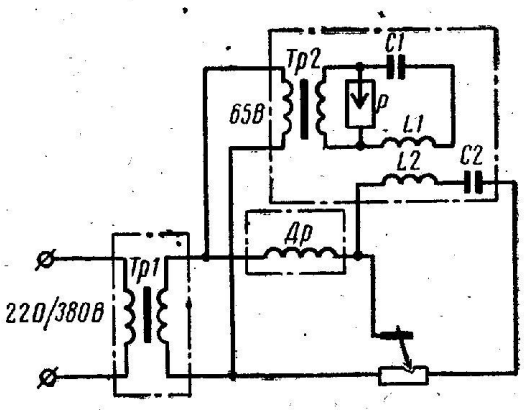


Рисунок 6.9 – Схема включення осцилятора ОС-1 у зварювальне коло: **Тр1** – трансформатор зварювальний; **Др** – дросель; **Тр2** – підвищувальний трансформатор осцилятора; **Р** – розрядник; **С1** – конденсатор контуру; **С2** – захисний конденсатор (не пропускає імпульси високої напруги частотою **50 Гц**); **L1** – котушка контуру; **L2 –** котушка зв'язку

Механізоване зварювання

Механізоване зварювання здійснюється зварювальними ***напівавтоматами***, що забезпечують автоматичну подачу електродного дроту і інших зварювальних матеріалів у зону плавлення. При цьому переміщення дуги вздовж виробу, що зварюється, здійснюється зварювальником вручну. Напівавтоматами для зварювання мають таке позначення:

1) виду виробу (**ПД**);

2) спосіб захисту зони дуги (**Г** – зварювання у середовищі активних захисних газів; **И** – у середовищі інертних газів; **У** – у середовищі активних і інертних газів; **О** – відкритою дугою; **Ф** – під флюсом);

3) номінальний струм у сотнях ампер.

Напівавтомати класифікуються:

– за ***способом захисту*** дуги (у ***середовищі захисних газів; під флюсом; без захисту; універсальні***);

– за ***типом електродного дроту*** (***суцільного перетину; порошкові; комбіновані***);

– за ***способом регулювання*** швидкості подачі електродного дроту (***плавні, східчасті, змішані***);

– за ***компонуванням*** (***однокорпусні*** і з ***виносним передаючим механізмом***).

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 6

1 Дайте визначення електричної дуги та назвіть основні області її застосування.

2 Які умови необхідні для запалювання та стабілізації дуги?

3 Чим відрізняються джерела живлення для зварювання постійним і змінним струмом?

4 Для чого застосовують осцилятор у зварювальних установках?

5 Які основні параметри зварювального режиму і як вони впливають на шов?

6 Поясніть суть процесу електродугового зварювання (за рис. 6.1).

7 Які переваги та недоліки контактного зварювання?

8 Які небезпеки для персоналу характерні для дугового зварювання і як їх мінімізують?

9 Які причини нестабільності дуги та як їх діагностують?

10 Які вимоги до електропостачання зварювальних постів у виробничих умовах?

Тема 7. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОЇ ОБРОБКИ

План

7.1 Загальні відомості про електрофізичні методи обробки продукції

7.2 Електрофізичні властивості сільськогосподарської продукції

7.1 Загальні відомості про електрофізичні методи обробки продукції

Методи обробки продукції можна розділити на такі групи:

1) ***Електрофізичні.*** Сюди належать такі методи обробки матеріалу, як електроерозійна, плазмова, магнітоімпульсна, електрогідравлічна, лазерна, ультразвукова.

2) ***Електрохімічні*** – до них відносяться такі методи, як електроліз, гальванотехніка, анодна обробка.

3) ***Аерозольна*** (електронно-іонна) технологія.

4) ***Електробіологічні.*** До них належать методи впливу на біологічні об'єкти електромагнітними полями.

Виходячи з цього можна дати такі визначення поняттю «електротехнологія»: електротехнологія – група різноманітних технологічних процесів, заснованих на використанні енергії електричного струму, електричного, електромагнітного, магнітного, а також ультразвукового поля, що підводиться безпосередньо до технологічного об'єкта та перетворюється в його робочій зоні в теплову, хімічну, механічну енергію, які й забезпечують (по-різному або разом) реалізацію заданого процесу.

У сільськогосподарському виробництві, на відміну від промисловості, електротехнологічні методи ще поки що не знайшли достатньо широкого застосування, що пов’язано з такими причинами:

– специфічність технологічних процесів у сільському господарстві, а саме те, що здебільшого ці процеси пов’язані з життєдіяльністю тварин і рослин.

– необхідність висококваліфікованого персоналу для обслуговування обладнання електротехнології.

– низький рівень культури виробництва, мала зацікавленість виробників сільськогосподарської продукції в підвищенні продуктивності праці та якості продукції, екологічній чистоті виробництва.

Відмінною позитивною особливістю технологій, пов'язаних з електричними методами обробки, є:

1) екологічна чистота;

2) можливість автоматизації;

3) невисока енергоємність;

4) у деяких випадках заміна електротехнологічних методів іншими методами не можлива.

Завданням вивчення цієї частини дисципліни «Електротехнології в АПВ» є вивчення електротехнологічних процесів, набуття навичок роботи з електротехнологічним обладнанням, а також освоєння методик розрахунків різного електротехнічного обладнання.

У сільськогосподарському виробництві об'єктами електротехнології є велике розмаїття як простих речовин, так і складних тіл, які характеризуються певними електрофізичними властивостями та величинами.

7.2 Електрофізичні властивості сільськогосподарської продукції

Будь-який сільськогосподарський продукт як об'єкт електротехнології характеризується такими властивостями: питомий електричний опір (провідність) ρ = [Ом м]; діелектрична проникність E = [Ф/м]; тангенс діелектричних втрат tgδ; магнітна проникність μ = [Гн/м].

Під час використання того чи іншого методу електротехнології якась властивість є визначальною і говорить про можливість застосування технології для перетворення продукту.

Властивості продукту визначаються його фізико-хімічним складом. Крім цього будь-який продукт має певну геометричну форму, а тому він характеризується електричними та магнітними величинами:

– електричний опір – R = [Ом];

– електрична ємність – C = [Ф];

– індуктивність – L = [Гн];

– повний електричний опір Z = [Ом].

Приклад: рослинна тканина має такі властивості: питомий опір; діелектрична проникність, магнітна проникність.

Рослина, що складається з цієї тканини, має складну геометричну форму. При впливі на неї електричного струму з будь-якою метою (пригнічення, симуляція тощо) необхідно знати, яким повним опором вона володіє. Величинами, що характеризують повний опір є: активний опір, індуктивність і ємність. Тому рослину можна представити у вигляді схеми із зосередженими електричними параметрами.

Усе розмаїття сільськогосподарських продуктів можна класифікувати за такими ознаками:

1) За фазовим станом продукти поділяють на газоподібні, рідкі, тверді.

2) За структурним складом на однорідні та неоднорідні.

3) За хімічною природою на органічні та неорганічні.

Електрофізичні властивості сільськогосподарських продуктів у переважній більшості не є стабільними. Наприклад, електропровідність ґрунту залежить від вологості і може змінюватися під час засолення ґрунту, ерозії тощо. Властивості насіння можуть залежати від часу збирання врожаю, умов зігрівання тощо.

Набагато стабільнішими характеристиками володіють мінеральні олії, повітря, пар, різні матеріали неорганічного походження.

7.2.1 Сили, що діють на частинки в електричному полі

В електричному полі на заряджену діють такі сили.

1. Сила, спричинена дією електричного поля на заряд частинки

$$F_q = E \cdot q, \tag{7.1}$$

де E – напруженість електричного поля в місці розташування частинки, В/м;

q – заряд частинки, Кл.

2. Сила, зумовлена нерівномірним розподілом напруженості електричного поля

$$F_n = 2\pi\varepsilon_0 a \frac{\varepsilon_1 + 1}{\varepsilon_2 + 2} gradE^2, \qquad (7.2)$$

де ε_0 – електрична стала, Ф/м ($\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$);

ε_2 – відносна діелектрична проникність;

a – радіус частинки, м.

3. Сила, викликана взаємодією заряду частинки з електродів (сила дзеркального відображення):

$$F_з = -\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 (2h)^2}, \qquad (7.3)$$

де q – заряд частинки, Кл;

h – відстань між часткою і площиною з провідного матеріалу, м.

Ця сила діє на частинку у відсутності електричного поля. Вона зумовлена тим, що заряджена частинка індукує (наводить) на площині протилежний за знаком заряд, між якими виникає сила тяжіння.

Крім електричних сил частинка відчуває механічні сили.

4. Сила тяжіння

$$F_g = mg\,, \qquad (7.4)$$

де m – маса частинки, кг.

g – прискорення вільного падіння

5. Сила опору середовища руху частинки

$$F_c = 6\pi\mu_a k_c (\vartheta_2 - \vartheta)\,, \qquad (7.5)$$

де μ – в’язкість середовища;

k_c, ϑ – параметри лінійної апроксимації у відповідному діапазоні значення числа Рейнольдса (Re).

На частинку, що знаходиться під дією електричного поля діють сили, що прагнуть розвернути її більшою віссю вздовж цього поля (рис. 7.1).

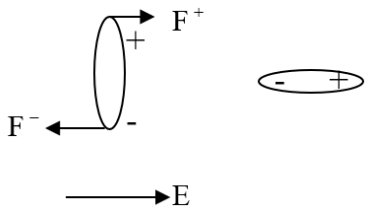


Рисунок 7.1 – Вплив електричного поля на частинку (диполь)

7.2.2 Заряджання частинок в електричному полі

Заряджання частинок здійснюється:

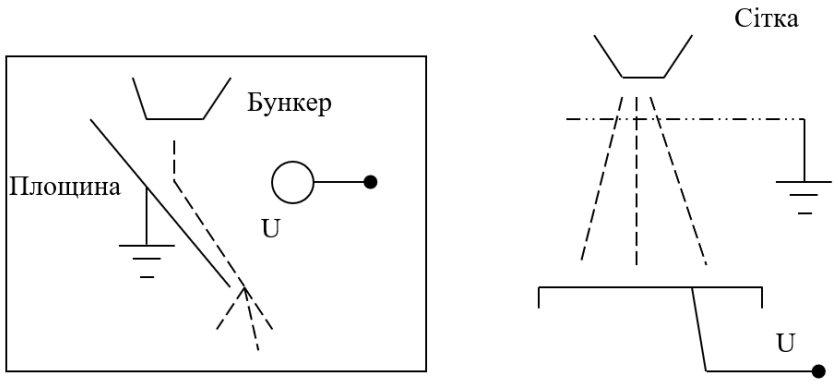
1) осадженням на поверхню частинки іонів з об’єкта газу, що оточує частинку;

2) електростатичною індукцією, яка відбувається в результаті поділу зарядів під час контакту частинки з електродом, що перебуває під потенціалом;

3) механічною, хімічною та тепловою електризацією.

Перший спосіб заряджання найбільш простий і тому найчастіше використовується. Він дає змогу отримати досить великий заряд частинки. Здійснюється поблизу коронного електрода в області коронного розряду, тобто в область дії сили тяжіння, де є об’ємний уніполярний розряд.

Осадження частинок відбувається під дією зовнішнього електричного поля. Процес заряджання зупиняється, коли відштовхувальна сила дорівнюватиме силі притягування. При цьому досягається максимальний або граничний заряд.



а *б*

Рисунок 7.2 – Схема пристрою заряджання
частинок електростатичною індукцією

Другий спосіб можна продемонструвати рис. 7.2. Частинки можуть заряджатися, скочуючись із бункера похилою площиною (рис. 7.2 а) або

стикаючись із металевою сіткою (рис. 7.2 а), що актуально для рідин, адже водночас вона розпиляється, а це сприяє процесу під час електрофарбування.

Цей метод дозволяє для порошкових або зернистих матеріалів отримати велике значення заряду, ніж у полі коронного розряду для провідних матеріалів, а для діелектричних – навпаки.

У третьому способі електризація відбувається під час взаємного тертя або розриву контакту в різнорідних матеріалах (зняття одягу), унаслідок деяких хімічних реакцій, під час нагрівання або охолодження.

В електро-іонній технології два останні типи заряджання відіграють другорядну роль (виняток становить електросепарація, де тертя, нагрівання та електростатична індукція використовується для розділення матеріалів. Індукція використовується для розділення матеріалів за фізичними властивостями.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 7

1 Що розуміють під електрофізичною обробкою і яка її типова технологічна мета?

2 Які електрофізичні властивості матеріалів є найважливішими для електрофізичної обробки?

3 Чим відрізняються провідники, напівпровідники та діелектрики з позицій електрофізичної обробки?

4 Що таке електрична міцність і як вона впливає на вибір напруги в установці?

5 Поясніть принцип дії установки електрофізичної обробки за рис. 7.1.

6 Які фактори середовища змінюють умови електрофізичної обробки?

7 Які основні методи оцінювання ефекту електрофізичної обробки на продукцію?

8 Які типові області застосування електрофізичної обробки в АПВ?

9 Які ризики та обмеження електрофізичної обробки для біологічних об’єктів?

10 Які вимоги електробезпеки є ключовими для установок електрофізичної обробки?

Тема 8. ЕЛЕКТРОІСКРОВІ ТА ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНІ УСТАНОВКИ

План

8.1 Електроіскрові установки

8.2 Електроімпульсні установки

8.1 Електроіскрові установки

8.1.1 Фізичні основи

Електроерозійна (електроіскрова обробка) – обробка металів імпульсами електричного струму. Метод полягає на явищі руйнування (ерозії) металів під дією електричних розрядів. Суть способу полягає у використанні руйнівної дії електричних іскрових розрядних імпульсів між електродами, що зближуються на відстань, яка пробивається цією напругою. Кожен імпульс викликає руйнування поверхні металу у вигляді лунки. Принцип дії електроерозійних установок пояснюється такою схемою.

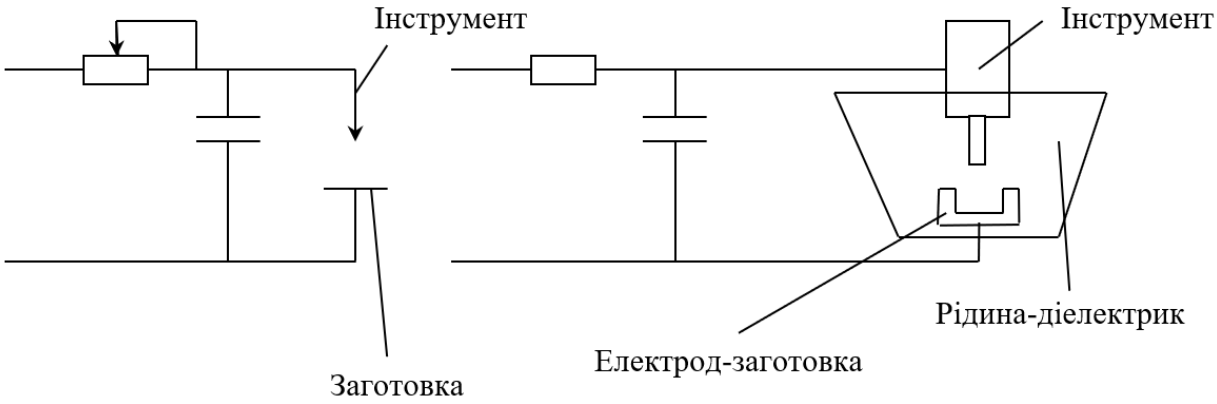


Рисунок 8.1 – Принципова схема електроерозійної установки

Діелектрик (гас, мастило, дистильована вода). У схемі (рис. 8.1) є 2 контури: 1 – живильний (зарядний) (*R, C*); 2 – розрядний (інструмент – заготовка).

Для здійснення процесу розрядний проміжок встановлюється таким, щоб напруга заряду конденсатора була більшою, ніж напруга пробою проміжку. При цьому напруга на конденсаторі зростатиме доти, доки не досягне напруги пробою.

Запасена конденсатором енергія протягом короткого часу виділиться в проміжку. Час розряду конденсатора значно менший за час заряду, тому що опір розрядного (іскрового) проміжку малий (0,01–0,1 Ом) порівняно із зарядним опором.

Розглянемо роботу генератора імпульсів (джерела живлення). Напруга на конденсаторі під час розряду

$$U_c = U_p \ell^{-\frac{\tau}{Tp}}, \tag{8.1}$$

де T_p – постійна часу розряду, с;

$$T_p = R_p C, \tag{8.2}$$

де R_p – опір дуги іскрового розряду, Ом;

C – ємність накопичувального конденсатора, Ф.

Вважаючи, що за час (4–5)T_p конденсатор повністю розрядиться (на практиці близько 95 %), струм розряду:

$$i = -\frac{dq}{dt} = \frac{d(C - U_c)}{dt} = -C\frac{dU_c}{dt} = \frac{CU_p}{T_p}\ell^{-\frac{\tau}{Tp}} = \frac{U_p}{R_p}(\ell^{-\frac{\tau}{Tp}}) = i_0\ell^{-\frac{\tau}{Tp}};$$

$$i = i_0\ell^{-\frac{\tau}{Tp}}. \tag{8.3}$$

Потужність на початку розряду

$$P_0 = \frac{U_p^2}{R_p}. \tag{8.4}$$

Наприклад, якщо $U_p = 100B$; $R_p = 0,01Ом$, тоді $i = \frac{100}{0,01} = 10000A$,

$P = \frac{100^2}{0,01} = 1000кВт$.

Оскільки іскровий проміжок дуже малий за довжиною і площею, а час розряду короткий, водночас густина струму і потужність великі, тому в малому об’ємі розвивається дуже висока температура T=10000 К. Під час впливу високої температури на метал відбувається:

– плавлення і випаровування металу в місці торкання іскри;

– випаровування і розкладання рідини, що оточує електроди.

– виникнення високого тиску (під час випаровування рідини утворюються гази) сприяють витісненню розплавленого металу з кратера. Викинуті крапельки набувають форми сфер (під дією сил поверхневого натягу).

– процес супроводжується тріском (шум).

Вплив частоти розрядів. Для збільшення частоти імпульсів процес потрібно проводити в діелектричній рідині, оскільки при цьому збільшується швидкість відновлення електричної міцності проміжку після розряду. Межею збільшення частоти циклів є перехід іскрової форми розряду у дугову. Виникнення дуги під час електроіскрової обробки спричиняє псування оброблюваного виробу.

Застосування діелектричних рідин дає змогу збільшити розрядний проміжок (і дає можливість його регулювати. Під час розрахунку електроерозійних апаратів визначають такі показники:

1. Продуктивність

$$Q = k \cdot P_p, \tag{8.5}$$

де k – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу електродів, рідини і тривалості імпульсів, $м^3 / с \cdot Вт$;

P_p – потужність у розрядному контурі, Вт.

2. Потужність, що виділяється в розрядному контурі

$$P_p = \left(\frac{P_{pk}}{P_{k=100}} \right) \cdot I_k \cdot U_H, \tag{8.6}$$

де P_{pk} – середня потужність у контурі при $I_k = 1A$; U=100 В.

Величину $\frac{P_{pk}}{P_{k=100}}$ визначають із графіка $\frac{P_{pk}}{P_{k=100}} = f(\lambda)$ (рис. 8.2), де λ – ступінь зарядки конденсатора.

Величину $P_{k=100}$ визначають для $I_k = 1A$ струм КЗ при $U_H = 100B$.

З графіка (рис. 8.2) видно, що максимум потужності отримує при $\lambda = 72\%$, при цьому $\frac{P_{pk}}{P_{k=100}} = 0,2$, тому максимум потужності

$$P_{p.\max} = 0,2U_H \cdot I_k . \qquad (8.7)$$

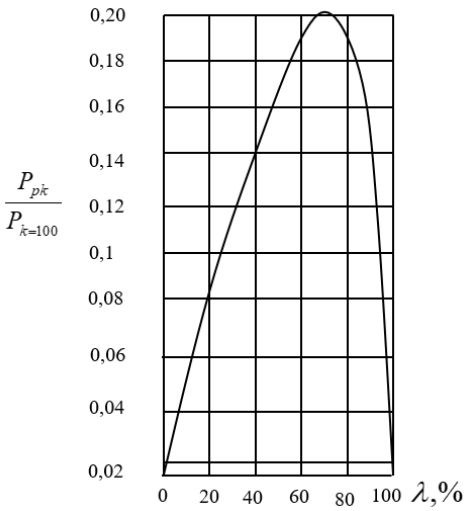


Рисунок 8.2 – Графік $\frac{P_{pk}}{P_{k=100}} = f(\lambda)$

У процесі роботи руйнується інструмент і виріб, тому збільшується зазор, що призводить до порушення процесу, тому електроду або виробу потрібно повідомити подавальний рух подачі.

8.1.2 Застосування іскрових розрядів для обробки рослинної сировини

Обробка рослинної сировини спрямована на пошкодження тканини рослин з метою прискорення дозрівання перед збиранням, інтенсифікації сушіння трави, ураження небажаних рослинних тканин на корені.

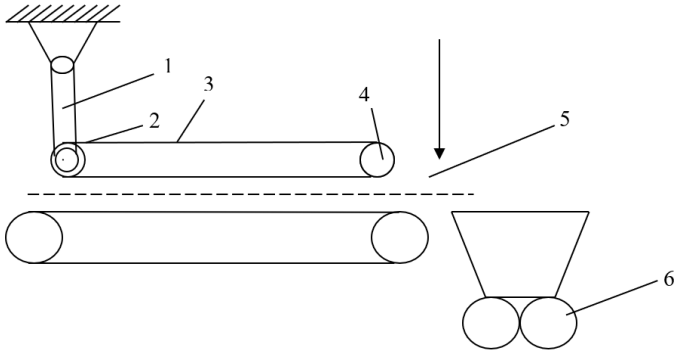


Рисунок 8.3 – Схема установки іскрових розрядів для обробки рослинної сировини: 1 – тяга; 2 –заземлювальний ролик; 3 – ізолююча тяга; 4 – копіювальний ролик; 5 – електрод; 6 – плющильні вальці

Для поліпшення сушіння іскрою пробивають зовнішній шар стебла рослин.

8.2 Електроімпульсні установки

Електричні загороди. Їх застосовують для випасу у загоні та огородження літніх таборів корів, телят, овець, свиней тощо. Електрична загорода включає в себе генератор електричних імпульсів високої напруги і власне огорожі. Огорожа являє собою сталевий оцинкований дріт, закріплений на ізоляторах. На дріт подається висока напруга. Висота підвісу дроту 30–90 см залежно від виду тварин. Один полюс генератора імпульсів заземлюють, інший – з'єднують зі струмопровідною лінією (СПЛ). Дотик до СПЛ тварини замикає ланцюг струму. Електричний струм, що проходить через тварину, викликає переляк і в результаті рефлекс боязні дотику до огорожі.

Перевага електроогорожі перед постійними огорожами полягає у:

1) знижуються витрати матеріалів (у 2–20 разів);

2) знижується час на спорудження огорожі;

3) знижуються витрати на її експлуатацію (у 2,5–4 разів) і ремонт;

4) можливість швидкого переставляння на інше місце.

Параметри електричних загород повинні забезпечувати достатній подразнювальний вплив, бути безпечними для людини і тварин. Електричні параметри огорожі такі: частота проходження імпульсів 1–2 Гц; тривалість імпульсу – 60 мс, перерва між імпульсами порядку 1с, амплітудне значення напруги 2–12 кВ, сила струму в імпульсі 0,2–10 А. Кількість електрики, що пройшла через тіло тварини, 2,5 А.

Одним з основних елементів генераторів імпульсів для електроогорож є накопичувач енергії – накопичувальний конденсатор. Залежно від того, як передається енергія від конденсатора до огорожі, розрізняють генератори з індуктивним виходом і генератори з ємнісним виходом.

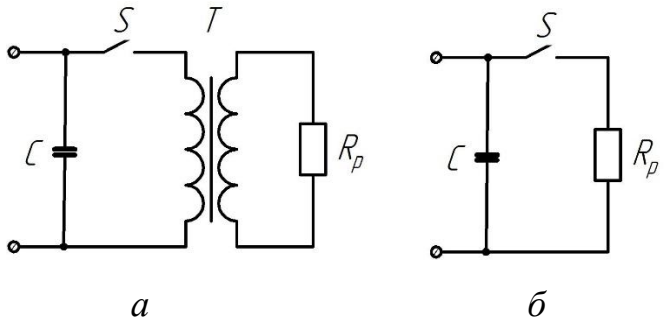


Рисунок 8.4 – Принципові електричні схеми генераторів:
а – генератор з індуктивним виходом; *б* – генератор з ємнісним виходом

У генераторі з індуктивним виходом використовується низьковольтні конденсатори великої ємності. При цьому напруга підвищується до необхідної величини під час проходження імпульсу струму в момент розряду конденсатора через первинну обмотку вихідного трансформатора. У генераторах з ємнісним виходом використовують високовольтні конденсатори меншої ємності.

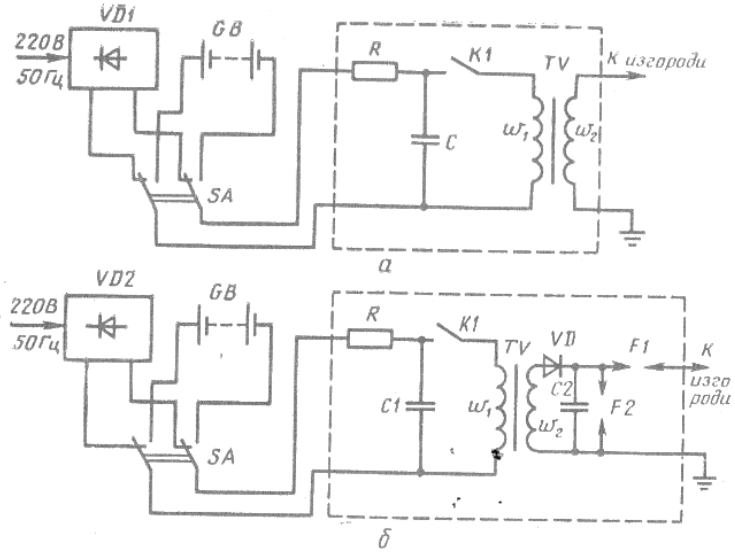


Рисунок 8.5 – Принципові електричні схеми генераторів імпульсів для електричних загороджень: *а* – з індуктивним; *б* – з безпосереднім виходом

Схема, рис. 8.5, працює так. Від мережі змінного струму відбувається заряд конденсаторів С1 і С2. Причому конденсатор С1 заряджається через опір R1 і є накопичувачем енергії. Конденсатор С2 заряджається по ланцюгу R2 – R3, який є частиною дільника напруги на резисторах R2, R3, R4. Після досягнення величини напруги на конденсаторі С2 рівня запалювання тиристора VT4

відбувається його запалювання і розряд конденсатора С2 по ланцюгу VT4 – RS – V3 – VT. При цьому відкривається тиристор VD3 і накопичувальний конденсатор С1 розряджається через тиристор VD3 і первинну обмотку трансформатора TV. При цьому у вторинній обмотці TV виникає імпульс високої напруги. Діод VD2 служить для захисту тиристора VD3 від зворотної перенапруги.

Генератори для електроогорож випускаються з комбінованим живленням (від мережі, від батарей 4,5 В х 4 шт., від акумулятора 12 В). У генераторах передбачається 2 режими роботи: автоколивальний (імпульси надходять безперервно), що чекає (імпульси виробляються тільки в разі дотику тварини до огорожі.

Виготовляються огорожі:

1) ІЕ200 з генератором ГІЕ-1;

2) огорожа ЕК-1М; 3) EZK10 (НДР).

Під час розрахунку основних активних елементів огорожі визначають: частоту розрядів *f*, Гц; ємність накопичувача *С*, Ф; опір зарядного резистора *R*, Ом.

Основи розрахунку електричних огорож.

Напруга на конденсаторі

$$U_c = U_H(1-\ell^{-\frac{\tau}{T_{3\leq}}}), \tag{8.8}$$

де U_H – номінальна напруга джерела живлення.

Тривалість заряджання конденсатора на порядок більша ніж тривалість розряджання, тому останнім нехтують. Заряджання конденсатора закінчиться, якщо $U_c=U_p$.

$$U_p = U_H(1-\ell^{-\frac{\tau_3}{T_3}}). \tag{8.9}$$

З цього виразу визначають тривалість заряджання

$$\frac{U_H - U_p}{U_H} = \ell^{-\frac{\tau_3}{T_3}};\ -\frac{\tau_3}{T_3} = \ln\frac{U_H - U_p}{U_H},$$

тоді

$$\tau_З = -RC\ln\frac{U_H - U_p}{U_H}. \quad (8.10)$$

Частота контуру

$$f = \frac{1}{\tau_З} = \frac{1}{RC\ln\frac{U_H}{U_H - U_p}}. \quad (8.11)$$

Ємність конденсатора

$$C = \frac{q}{U_p}, \quad (8.12)$$

де q – необхідний заряд, Кл;

U_p – напруга розряду, В.

Зарядний опір

$$R = \frac{1}{fC\ln\frac{1}{1-\frac{U_p}{U_H}}}. \quad (8.13)$$

Потужність конденсатора

$$P_c = \frac{CU_p^2}{2}\cdot f. \quad (8.14)$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 8

1 У чому принципова різниця між електроіскровими та електроімпульсними установками?

2 Які основні елементи імпульсного кола?

3 Від яких параметрів залежать енергія та форма імпульсу?

4 Які технологічні процеси в АПВ можуть використовувати імпульсні впливи?

5 Поясніть принципову схему за рис. 8.1: як відбувається розряд і де підводиться енергія?

6 Які переваги імпульсної обробки порівняно з тривалим нагрівом під час механічного впливу?

7 Які обмеження і ризики для електроіскрових та електроімпульсних установок є типовими?

8 Чому стан робочого проміжку критичний для повторюваності процесу?

9 Як оцінюють ефективність електроімпульсної обробки?

10 Які заходи безпеки необхідні під час експлуатації імпульсних високовольтних установок?

Тема 9. ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНІ УСТАНОВКИ

План

9.1 Електрогідравлічні установки

9.2 Фізична природа електрогідравлічного ефекту

9.3 Область застосування електрогідравлічних установок

9.1 Електрогідравлічні установки

Робота електрогідравлічних установок базується на використанні електрогідравлічного ефекту.

Електрогідравлічний ефект – це сукупність фізичних явищ, що виникають у рідкому середовищі під час пропускання через нього імпульсного електричного розряду високої напруги. Ефект проявляється у формуванні ударних хвиль, кавітаційних процесів, локального плазмоутворення та інтенсивних гідродинамічних потоків, які можуть використовуватись для технологічної обробки матеріалів і середовищ.

Принцип дії. У міжелектродному проміжку, зануреному в рідину, створюється короткочасний високовольтний імпульс. Внаслідок пробою формується плазмовий канал, який миттєво розширюється та генерує потужну ударну хвилю. Подальше схлопування кавітаційних бульбашок і турбулентні гідродинамічні збурення забезпечують механічний, фізико-хімічний та тепловий вплив на об’єкт обробки.

Види установок, що використовують електрогідравлічний ефект:

1) установки електроіскрової та електрогідроімпульсної обробки – для руйнування, дроблення, очищення та деформаційної обробки матеріалів;

2) електрогідравлічні дробарки і дезінтегратори – для подрібнення гірських порід, відходів, твердих включень у рідині;

3) установки очищення та знезараження води – використовують ударні хвилі й активні радикали для деструкції органічних домішок і мікроорганізмів;

4) технологічні установки для інтенсифікації хімічних процесів – покращення змішування, диспергування та активації реакцій у рідких середовищах;

5) установки формоутворення і штампування імпульсним тиском – застосовуються для обробки тонколистових матеріалів через гідроудар.

Особливості дії ефекту:

– імпульсний характер енергетичного впливу;

– поєднання механічної (ударні хвилі), гідродинамічної та електрофізичної дії;

– висока локальна енергонасиченість процесу при відносно малому середньому енергоспоживанні;

– можливість безконтактного впливу на об’єкт через рідке середовище.

Переваги та недоліки застосування електрогідравлічного ефекту.

Переваги:

– висока інтенсивність локального впливу;

– можливість обробки складних або крихких матеріалів без механічного контакту;

– універсальність застосування в різних технологічних процесах;

– інтенсифікація масо- та теплообміну в рідинах

Недоліки:

– складність високовольтного імпульсного обладнання;

– підвищені вимоги до електробезпеки та герметичності;

– ерозія електродів і обмежений ресурс розрядних вузлів;

– шум і вібрації під час роботи

9.2 Фізична природа електрогідравлічного ефекту

Електрогідравлічний ефект – виникнення високого тиску у рідині при збудженні у ній імпульсного електричного розряду.

Під час імпульсного електричного розряду у рідині відбувається швидше виділення енергії у каналі розряду. Унаслідок цього тиск у каналі розряду швидко підвищується, канал розширюється, що призводить до виникнення ударної хвилі та потоків рідини.

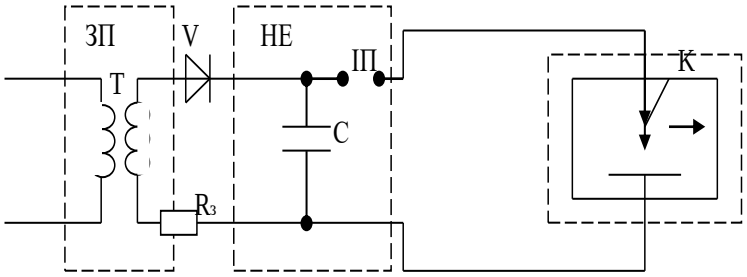


Рисунок 9.1 – Принципова електрична схема електрогідравлічної установки: ЗП – зарядний пристрій; НЕ – накопичувач енергії; ТБ – технологічний блок; К – канал розряду; ІП – іскровий проміжок; К – канал розряду

Електрогідравлічна установка складається із зарядного пристрою ЗП і накопичувача енергії НЕ. Накопичувач енергії утворений батареєю імпульсних конденсаторів високої напруги (30–70 кВ) ємністю 3–1500 мкФ і іскровим проміжком або розрядником ІП, а також технологічним блоком, який містить певний об’єм рідини, систему електродів, між якими створюється імпульсний розряд. У технологічний блок поміщається оброблюваний об’єкт поблизу каналу розряду.

Принцип дії електрогідравлічної установки поданий нижче. Зарядний пристрій заряджає конденсатор протягом часу $\tau_з$. Напруга конденсатора підвищується до величини пробою іскрового проміжку І. У цей момент накопичувач (С) під’єднується до електродів технологічного блоку, водночас починається початкова стадія розряду. Напруга на конденсаторі трохи падає через електропровідність рідини. При цьому виникає ударна хвиля тиску і пульсуюча за розмірами газова порожнина. Ударна хвиля на деякій відстані запускає і переходить у звукову. Канал розряду на початку процесу розширюється з максимальною швидкістю. Після припинення протікання струму порожнина каналу розряду внаслідок інерційності довкілля продовжує розширюватися, досягає граничних розмірів, а потім починає стискатися. У процесі розширення температура і тиск у ній падають, а під час стиснення підвищуються. Це призводить до загасаючих пульсацій порожнини. Період

коливання порожнини у кілька разів перевищує тривалість розряду. Розміри порожнини можуть становити від одиниці до десятків сантиметрів.

У процесі розряду напруга на конденсаторі падає і стає недостатньою для підтримання розряду. Розряд припиняється і проміжок деіонізується. Далі цикл повторюється.

Частота циклів визначається параметрами ланцюга.

Тривалість розряду значно перевищує тривалість заряду, оскільки опір каналу іскрового розряду значно менший за опір зарядного ланцюга. Тривалість розряду визначається постійною часу $R_з C$ зарядного ланцюга.

Час розряду визначається не лише опором каналу, а і індуктивним опором з'єднувальних проводів. Тому з'єднання накопичувача енергії з технологічним блоком виконується низькоіндуктивним коаксільним кабелем високої напруги, який попутно послаблює електромагнітні поля поблизу установки.

Якщо під час пробою іскрового проміжку струм зростає незначно, то після пробою рідини він різко зростає, оскільки опір каналу розряду невеликий.

Струм розряду може досягати десятків і сотень кілоампер, завдяки чому плазма в каналі розігрівається до температури 10^4 К.

Розрахунок електричного пробою. Процес пробою залежить від: максимального значення електричного поля в проміжку між електродами, електропровідності води, відстані між електродами.

Якщо напруженість електричного поля не перевищує критичного значення $E_{кр}$ (для води $\tau = 2{,}5 \cdot 10^{-2} см / м$; $E_{кр} = 3{,}6 МВ / м$), розряд можливий тільки після закипання рідини, тобто рідина спочатку прогрівається струмом між електродами до 100 °С, а потім відбувається пробій каналу розряду завдяки підвищенню кількості іонів у проміжку.

Такий пробій називається **тепловим**. При тепловому пробої в однорідному полі час пробою визначається виразом

$$t_{пр} = \frac{c_p \rho \cdot l^2}{\tau_0 \cdot 2 \cdot U^2} \ln \frac{1 + \lambda T_2}{1 + \lambda T_1}, \qquad (9.1)$$

де c_p – теплоємність рідини, $Дж / (кг° C)$;

ρ – густина рідини, $кг / м^3$;

l – відстань між електродами, м;

τ_0 – питома провідність рідини при $0°C, Ом / м$;

λ – температурний коефіцієнт провідності, $1/°C$;

U – напруга, B;

T_1 – початкова температура, $°C$;

T_2 – температура закипання рідини, $°C$ ($T_2 = 100°C$ для води).

Найбільша відстань між електродами, за якої можливий тепловий пробій

$$l_{\max} = \frac{2 \cdot c_p \rho \cdot S(T_2 - T_1)}{C \cdot E_{кр}^2}, \tag{9.2}$$

де S – площа електродів, $м^2$.

Формулу (9.2) можна подати у вигляді

$$\frac{c(E_{кр}^2 \cdot l)^2}{2} = c_p \cdot \rho \cdot S \cdot l \cdot (T_2 - T_1) \tag{9.3}$$

тоді ліва частина являє собою енергію конденсатора, а права – енергію, що необхідно витратити на нагрівання рідини до температури пароутворення.

При напрузі електричного поля вище $E_{кр}$ має місце лідерний пробій, тоді час пробою

$$t_{пр} = \frac{a \cdot l}{(U - U_0)^2}, \tag{9.4}$$

де a – постійна (для води $a = 3{,}6 \cdot 10^5 B^2 \cdot с / м$);

U_0 – напруга, що відповідає критичній напруженості $E_{кр}$.

За форми електрода у вигляді стержня (для системи «стержень – площина»)

$$U_0 = \frac{E_{кр}}{2} r \ln\left(\frac{4l}{r}\right), \tag{9.5}$$

де r – радіус заокруглення кінця електрода.

Розрахунок електричних характеристик каналу розряду

Для такого кола 2-й закон Кірхгофа у диференціальній формі

$$\begin{cases} L\dfrac{di}{dt}+\dfrac{1}{c}\int idt+iR=0; \\ L\dfrac{d^2t}{dt^2}+R\dfrac{di}{dt}+\dfrac{1}{c}=0. \end{cases} \tag{9.6}$$

Система рівнянь (9.6) може мати 2 розв'язки.

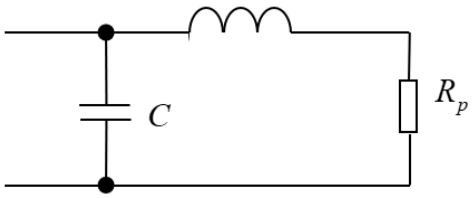


Рисунок 9.2 – Схема заміщення електрогідравлічної установки:

$L_{пр}$ – індуктивність сполучних проводів; R_p – опір каналу розряду;

C – конденсатор накопичувача енергії

Якщо виконується співвідношення

$$R<2\sqrt{\frac{L}{c}}, \tag{9.7}$$

тоді ми маємо періодичні загасаючі коливання. В іншому разі розв'язок буде у вигляді оберненої експоненти.

Для отримання потужної ударної хвилі необхідно створити загасаючий періодичний розряд.

Індуктивність розрядного ланцюга зазвичай лежить у межах $(1–10)\cdot 10^{-6}\,Гн$.

Опір каналу розряду в момент максимального струму

$$R_к=4,4\cdot 10^7 l\cdot I_{\max}^{-1,5}. \tag{9.8}$$

Максимум сили струму

$$I_{\max}=0,5U\sqrt{\frac{C}{L}}. \tag{9.9}$$

Максимальна потужність

$$P_{\max} = I_{\max}^2 R_к . \qquad (9.10)$$

В електрогідравлічних установках міжелектродна відстань 1–10 см, тривалість електричних розрядів 10–40 мкс, сила струму в імпульсі 10–50 кА, миттєва потужність імпульсу 200 мВт, енергія імпульсу 1–300 кДж, частота 0,1–2 Гц.

Схеми розрядних контурів ЕГ установок. В ЕГ установках можуть використовуватися схеми з допоміжними пристроями, що забезпечують електричний пробій одного або декількох проміжків у технологічному блоці.

Якщо робоча напруга накопичувача енергії недостатня для пробою проміжку, застосовують генератор імпульсної напруги (ГІН), який приєднують до проміжку у рідині.

Робочу напругу ГІН обирають, виходячи з провідності рідини з умови забезпечення електричного пробою. У цій схемі використовується керований розрядник, що витримує номінальну напругу ГІН і спрацьовує від пускового імпульсу, який надходить із деяким запізненням після спрацьовування ГІН.

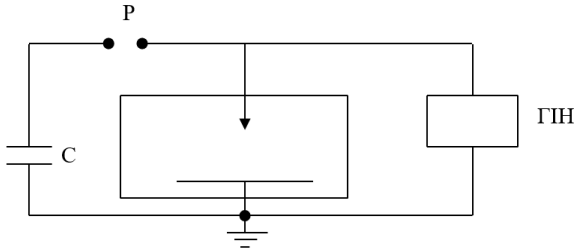


Рисунок 9.2 – Схема розрядного контуру з ГІН

Наявність розрядника у ЕГ установках призводить до додаткових втрат енергії. Цей недолік виключається введенням до установки індуктивного накопичувача енергії та тиристорного керування.

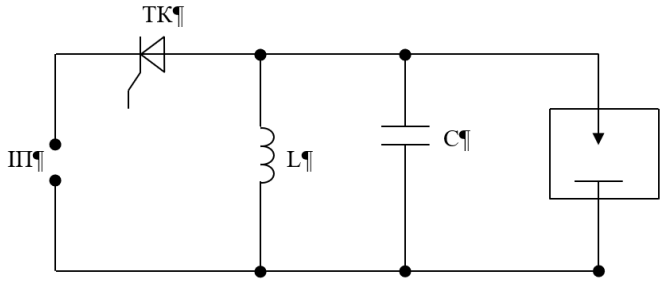


Рисунок 9.3 – Схема з індуктивним накопичувачем і тиристорним комутатором

Індуктивність *L* накопичує енергію від джерела через тиристорний комутатор.

Під час увімкнення ТК індуктивність віддає енергію конденсатору і розрядному проміжку.

У багатоконтурних установках застосовують такі схеми (рис. 9.4).

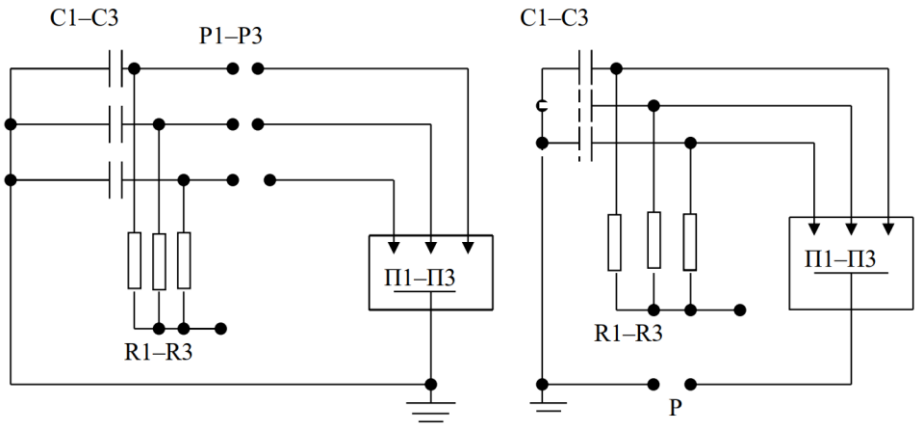


Рисунок 9.4 – Схеми електрогідравлічної багато контурної установки

9.3 Область застосування електрогідравлічних установок

Електрогідравлічний ефект застосовується у ремонтному та машинобудівному виробництві для очищення деталей, у гірничодобувній і переробній промисловості для дроблення матеріалів (наприклад, подрібнення каменів, при цьому у валуні створюють шнур до 1/3 висоти валуна), у водопідготовці та екологічних технологіях для очищення рідин (бактерицидний вплив ЕГЕ), а також у спеціальних технологічних процесах інтенсифікації хімічних реакцій і імпульсного формоутворення металів (наприклад, пластичної

деформації матеріалів (обробки металів тиском, штампування, розвальцьовування) та формувальних сумішей.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 9

1 Що таке електрогідравлічний ефект і які фізичні явища його супроводжують?

2 Які етапи відбуваються під час розряду у рідині?

3 Які параметри імпульсу визначають інтенсивність електрогідравлічного ефекту?

4 Які основні вузли електрогідравлічної установки наведено в темі (за рис. 9.1)?

5 Які області застосування електрогідравлічного ефекту в АПВ?

6 Які обмеження електрогідравлічного ефекту пов’язані з властивостями рідини?

7 Які типові причини зниження ефективності електрогідравлічного ефекту при тривалій роботі?

8 Які вимоги до ізоляції та заземлення є специфічними для електрогідравлічних установок?

9 Як оцінити енергетичну ефективність електрогідравлічної обробки в порівнянні з альтернативними методами?

10 Які параметри процесу бажано контролювати автоматично?

Тема 10. УЛЬТРАЗВУКОВІ УСТАНОВКИ

План

10.1 Фізичні основи ультразвуку

10.2 Застосування ультразвуку у технологічних процесах

10.3 Вплив ультразвуку на біологічні об’єкти

Ультразвукова технологія знайшла і завойовує дедалі ширше застосування як у промисловості, так і у сільському господарстві, науці, медицині. За її допомогою можна істотно інтенсифікувати основні технологічні процеси і в ряді випадків отримати якісно нові показники.

10.1 Фізичні основи ультразвуку

Звук – це коливання, хвильовий рух із малими амплітудами в стисливих середовищах (газ, рідина, тверде тіло). Звук – це механічне явище.

Як правило звуком називають діапазон частот від 16 Гц до 20 кГц, тобто ті частоти, які вловлює вухо людини.

Діапазон частот звуку поділяють на піддіапазони:

а) 0 – 16 Гц – інфразвук;

б) 16 Гц – 20 кГц – звук;

в) 20 кГц – 10^{10} Гц – ультразвук (УЗ);

г) 10^{10} і більше – гіперзвук.

Відмінностей у фізичній природі, природно, у цих інтервалах немає. Однак такий поділ пов’язаний із практичним застосуванням УЗ.

Акустичне (від слова звукове) поле характеризується такими параметрами:

1) швидкість (V);

2) амплітуда зміщення (A);

3) звуковий тиск (P);

4) інтенсивність УЗ (J);

5) частота УЗ (f);

6) довжина хвилі (λ).

Особливості поширення УЗ у середовищі залежать від його властивостей:

1) швидкість звуку (c);

2) поглинання звуку середовищем (α).

Якщо розглянути найпростіший випадок, тобто одновимірне поширення плоскої хвилі, то зміщення визначиться

$$A = A_0 \sin(\omega\tau + kx), \qquad (10.1)$$

де A_0 – амплітуда зміщення;

ω – кутова частота, рад/с;

k – хвильове число, рад/м.

Швидкість зміщення

$$V = V_0 \cos(\omega\tau + kx). \qquad (10.2)$$

Звуковий тиск

$$P = v \cdot \rho c, \qquad (10.3)$$

де ρ – густина середовища.

Інтенсивність УЗ

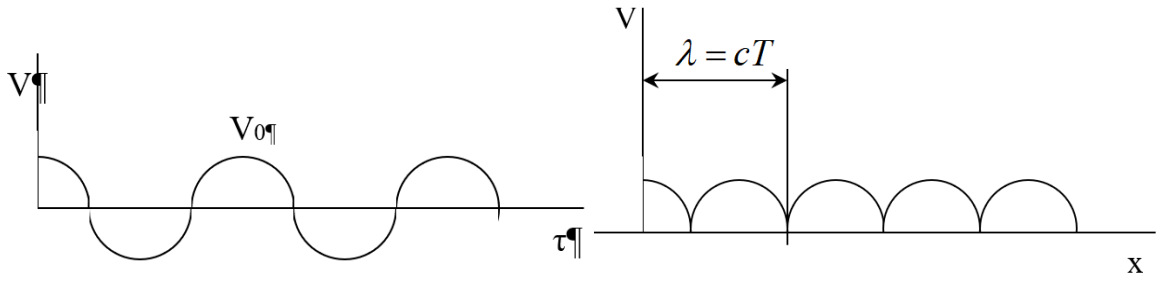
$$J = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{P^2}{\rho c} d\tau, \qquad (10.4)$$

якщо замість P підставити $P = P_0 \cdot \sin(\omega\tau)$ та інтегрувати, тоді отримаємо

$$J = \frac{P^2}{2\rho c}; \qquad \dim J = \frac{Bm}{м^2}. \qquad (10.5)$$

Добуток, що входить у формулу ρc залежить тільки від середовища, тобто є його характеристикою. Цей добуток називають ***акустичним опором середовища***.

Між акустикою і теорією електричного кола іноді проводять аналогію: $V \leftrightarrow P$; $J \leftrightarrow S$; $i \leftrightarrow V$; $R \leftrightarrow \rho c$.



а *б*

Рисунок 10.1 – Графіки швидкості зміщення ультразвукової плоскої хвилі: а – звичайна; б – модульована

Нижче подані тотожності величин, що характеризують електричні та акустичні параметри. Вказані взаємозвязки часто використовують для створення засобів вимірювання непрямої дії.

Електричні величини:

1) струм $i = \frac{U}{R}$;

2) потужність $S = \frac{U^2}{R}$;

Акустичні величини:

1) швидкість $V = \frac{P^2}{\rho c}$;

2) інтенсивність $J = \frac{P^2}{2\rho c}$.

Поглинання звуку

Під час поширення у середовищі амплітуда звуку зменшується. Це пов’язано з розсіюванням і поглинанням. Зменшення відбувається за експоненціальним законом

$$A_X = A_0 e^{-\alpha x}, \qquad (10.6)$$

де α – коефіцієнт поглинання.

Він показує, на якій відстані амплітуда зменшиться у *e* раз.

Поглинання здебільшого пов’язане з тертям між частинками рідини та релаксаційними явищами. У рідині в основному визначається в’язкістю, а залежить від частоти $\alpha \equiv f^2$.

Якщо звук зустрічає межу розділу двох середовищ, відбувається його відбиття.

Коефіцієнт відбиття – це відношення амплітуди відбитої хвилі та падаючої

$$k_{відб} = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}. \quad (10.7)$$

Іноді використовують $k_{відб}$ як відношення інтенсивності відбитої хвилі до падаючої

$$k_{відб} = (\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2})^2. \quad (10.8)$$

В УЗ полях зустрічається явище дифракції та інтерференції.

Дифракцією хвиль називають огинання хвиль перешкод, якщо вони менші за довжину хвилі.

Інтерференцією – накладення двох і більше хвиль, при якому хвиля посилюється або слабшає. Тут працює принцип суперпозиції, тобто процес можна розглядати як такий, що складається з однієї хвилі або з декількох.

Явище використовується у резонаторах для випромінювання потужного УЗ.

Одиницею вимірювання рівнів акустичних потужностей.

$$L = \lg \frac{J_1}{J_2} = 2 \lg \frac{P_1}{P_2}. \quad (10.9)$$

10.2 Застосування ультразвуку у технологічних процесах

Активний вплив звуку на речовину зумовлений низкою специфічних ефектів, що виникають у полі УЗ. До таких ефектів належать: кавітація рідин, акустичні течії у газах і рідинах, коагуляція частинок, диспергування твердих і рідких тіл тощо.

Під дією зазначених явищ відбуваються незворотні зміни з об’єктом УЗ обробки або відбувається інтенсифікація різних процесів.

УЗ вплив широко застосовується у промислових технологіях, знаходить він своє застосування і у сільському господарстві.

Розглянемо фізичну суть явищ, що виникають в УЗ полі у газах, рідинах і твердих тілах.

Фізичні явища у полі УЗ. ***Кавітація*** – утворення у рідині пульсуючих бульбашок (порожнин), заповнених парою, газом або їх сумішшю. Кавітація буває гідродинамічною та акустичною.

Гідродинамічна кавітація зумовлюється сильним локальним зниженням тиску у рідині внаслідок великих швидкостей течії.

Акустична кавітація виникає під час проходження звукової хвилі великої інтенсивності. При цьому під час напівперіодів розрідження виникають кавітаційні бульбашки, які різко зачиняються після переходу в зону підвищеного тиску, породжуючи сильні гідродинамічні збурення у рідині, інтенсивне випромінювання акустичних і ударних хвиль, що спричиняють руйнування поверхонь твердих тіл, що межують із рідиною, що кавітує.

Кавітація виникає в тих місцях, де тиск стає нижчим за критичний, що відповідають порогу кавітації.

Теоретично поріг кавітації (або тиск, за якого рідина втрачає суцільність, тобто розривається) дуже високий – 1500 ат, проте насправді розрив суцільності настає за набагато нижчих тисків, приблизно 1 ат, що пов’язано з тим, що в будь-якій рідині зародки кавітації – мікроскопічні газові бульбашки, тверді частки, з тріщинами, – заповнені газом тощо.

Кавітація виникає внаслідок швидкого зростання зародків бульбашок у ділянці зниженого тиску.

Зростання бульбашок відбувається внаслідок дифузії газу з рідини в бульбашки і випаровування.

Потрапляючи в область високого тиску бульбашка схлопується і утворюється кілька атомів, що є зародками для нових центрів кавітації.

Отже, процес розмноження бульбашок схожий на ланцюгову реакцію. Протягом кількох періодів утворюється стійка кавітаційна область, яка супроводжується білим шумом і іноді світінням іонізованого в бульбашках газу. Розміри бульбашок різні: від 1 мкм до 0,1 мм.

Кавітація як явище може бути корисною і шкідливою. Наприклад, гідродинамічна кавітація спричиняє ерозійне руйнування гвинтів кораблів. Акустична кавітація знайшла широке застосування у різних технологічних процесах: дегазація рідин, руйнування поверхні твердих тіл, диспергування, УЗ очищення, одержання дрібнодисперсних емульсій рідин, що не змішуються, тощо.

Коагуляція – процес зближення і укрупнення зважених у газі або рідині дрібних твердих частинок, рідких крапельок або газових бульбашок під дією звукових коливань.

При накладенні звукового поля виникають додаткові сили, що сприяють з'єднанню частинок. Після зіткнення частинки укрупнюються, випадають в осад або фільтруються.

Фізико-хімічні ефекти, зумовлені кавітацією

Полягають у руйнуванні високомолекулярних органічних сполук.

Наприклад, молекула крохмалю може руйнуватися до декстринів, а декстрини до моноцукрів.

10.2.1 Ультразвукова очистка твердих тіл

УЗ очищення – спосіб очищення поверхні твердих тіл при якому в мийний розчин подають з використанням УЗ коливань.

При УЗ очищенні вдається не тільки прискорити процес очищення, а й отримати високий ступінь частоти поверхні, а також замінити ручну працю, виключаючи використання пожежонебезпечних і токсичних розчинників.

Використовується у промисловості для очищення напівпровідників від оксидних плівок, деталей точних приладів, годинникових механізмів, ювелірних виробів, хірургічних інструментів, фільтрів, зокрема фільтрів паливної апаратури ДВЗ, деталей перед нанесенням захисних покриттів.

Механізм очищення зумовлений таким ефектом як кавітація та акустичні течії. Використовується з УЗ частотою f = 20–100 кГц, інтенсивністю J = 2–20 Вт/см^2 (кавітаційна область).

У процесі очищення відбувається руйнування поверхневих плівок забруднень, відшарування і видалення забруднень, їх емульгування і відшарування.

Руйнування і відшарування забруднень відбувається внаслідок взаємодії ударних хвиль, що породжуються кавітаційними бульбашками, які можуть перебувати як безпосередньо на забрудненні, так і в мийному розчині. Крім цього, під час відшаровування краю плівки виникає місце для зародка кавітації, який зростає з пульсацією, відшаровуючи плівку.

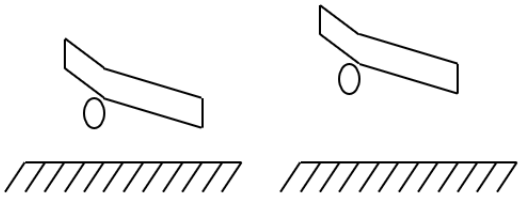


Рисунок 10.2 – Схема відділення частинки
забруднення кавітаційною бульбашкою

УЗ установки для очищення

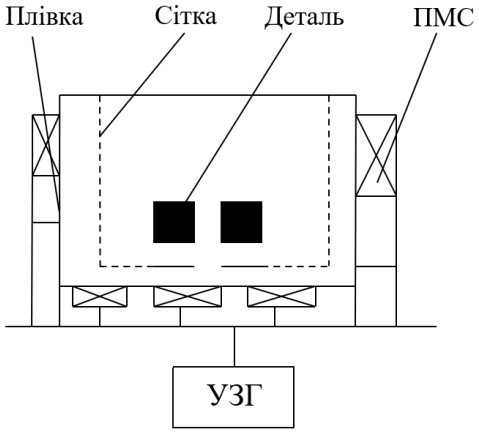


Рисунок 10.3 – Принципова схема УЗ установки для очищення деталей

Переваги УЗ мийки полягають у можливості проникнення УЗ в мікропори, нерівності, фігурні та глухі отвори.

УЗ очищення в основному здійснюється у ваннах очищення.

Об’єм ванни складає від 0,2 л до сотень літрів.

Для очищення великих виробів застосовують спеціальні УЗ прилади. Наприклад, для очищення внутрішньої поверхні труб застосовується конструкція, зображена на рис. 10.4.

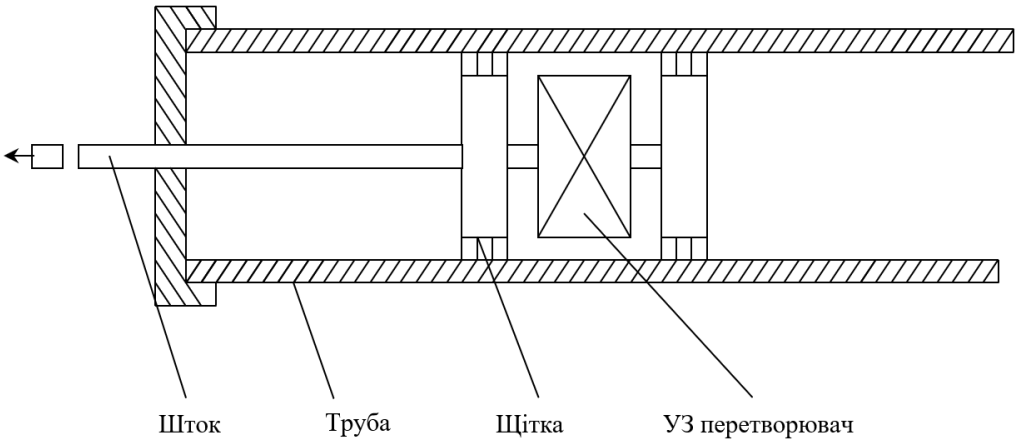


Рисунок 10.4 – Принципова схема установки УЗ очищення труби

На ефективність очищення істотно впливає склад мийного розчину.

Як мийні розчини використовують воду з добавками поверхнево-активних речовин (порошок, мило тощо), водні лужні розчини, як органічні розчинники використовують бензин, хлористий вуглець, бензол, ацетон тощо.

10.2.2 Ультразвукова дегазація

УЗ дегазація – зменшення вмісту газу в рідині, що перебуває у ній як у розчиненому стані, так і у вигляді бульбашок під дією акустичних коливань УЗ діапазону.

Розчинність газу у будь-якій рідині характеризується константою розчинності і прямопропорційна статичному тиску

$$C = k \cdot P_c, \qquad (10.10)$$

де k – константа розчинності;

P_c – статичний тиск.

Так, у дистильованій воді за нормальних фізичних умов (20 °С; 0,101 МПа) міститься 2 об.% розчиненого повітря.

Для того, щоб розчинений газ видалити, потрібно знизити тиск.

Однак процес виходу газу дуже тривалий, оскільки він обумовлений дифузією газу до поверхні рідини і незначним утворенням бульбашок.

Цей процес можна значно прискорити, якщо у рідині створити кавітаційну область.

У результаті в рідині створюється велика кількість зародків бульбашок. У ці бульбашки дифундує розчинений поблизу зародка газ, бульбашка зростає і спливає. Швидкість дегазації збільшується у 100–1000 разів.

УЗ дегазація використовується у металургії для дегазації розплавів алюмінію та інших металів.

Під час плавлення металу в ньому перебуває велика кількість як розчиненого, так і вільного повітря, яке під час кристалізації металу збирається в капсулах, при цьому метал втрачає однорідність. Під впливом звуку дрібні бульбашки, що перебувають у розплаві, збираються, коагулюють і залишають метал.

Дегазація так само використовується в процесах очищення рідин.

10.2.3 Ультразвукове очищення рідин

УЗ може інтенсифікувати багато процесів, пов’язаних з очищенням рідин. Але на процес інтенсифікації впливають такі фактори: коагуляція зважених частинок в УЗ полі, диспергування освітлювальних препаратів, дегазація рідини.

У сільському господарстві здійснюються спроби застосування УЗ для очищення тваринницьких станків. УЗ застосовують для диспергування вапна. Для освітлення соків і виноматеріалів.

УЗ застосовують для диспергування освітлювальних препаратів (желатин, бентоніт тощо), кристалізація винного каменю (швидкість кристалізації прискорюється у 10–100 разів) і флотаційного очищення.

Флотаційне очищення може застосовуватися для соків і рослинних олій.

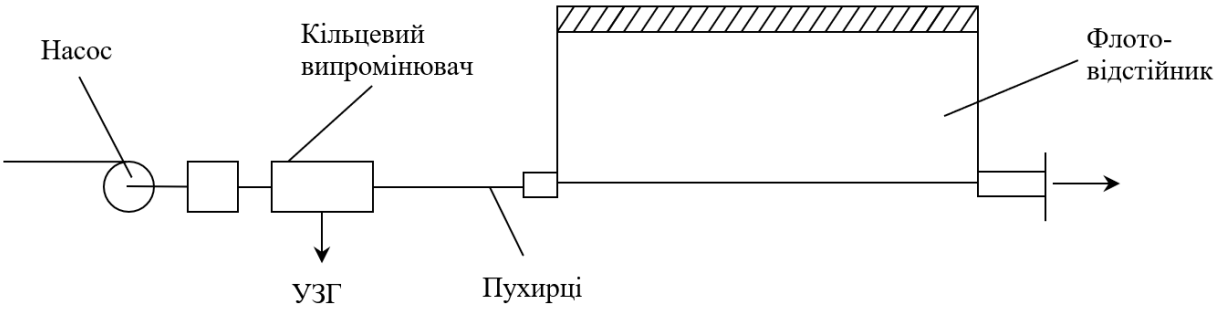


Рисунок 10.5 – Принципова схема флотаційного очищення рідин

10.3 Вплив ультразвуку на біологічні об’єкти

Залежно від інтенсивності УЗ і тривалості УЗ обробки УЗ може чинити як позитивний, так і негативний вплив. При малих інтенсивностях (до 2 Вт/см^2 і частотах 10^5–10^6 Гц) відбувається своєрідний мікромасаж тканинних елементів, що сприяє кращому обміну речовин. Такий вплив покращує постачання кров’ю і лімфою тканин людини і тварин. Потужніший звук може викликати розрив тканин у випадку виникнення акустичної кавітації в клітинах тканини.

УЗ застосовують для руйнування тифозних і туберкульозних паличок.

При опроміненні насіння сільськогосподарських рослин УЗ низької інтенсивності прискорюється його проростання.

Так у БАТУ у 1994 р. проведено низку досліджень з УЗ оброблення насіння капусти і моркви. Обробку насіння проводили за $J = 0{,}5$ Вт/см^2 $f = 21$ кГц протягом від 3 до 15 хв. Встановлено, що УЗ вплив активізує процеси проростання насіння капусти і моркви, підвищує на 5–10 % посівну якість і знижує зарядженість бактерицидною інфекцією на 60–80 %, а грибковою на 25 %. Швидкість росту розсади капусти збільшилася на 4,8 см, а листова поверхня – на 8 см^2.

Закономірності впливу УЗ на живий організм ще недостатньо вивчені.

Механічне оброблення УЗ, розмірне оброблення. Дозволяє вирізати пластини будь-якої форми з кераміки кварцу, напівпровідників, виготовляти отвори складної форми у твердих і крихких матеріалах.

Торець здійснює коливання з f = 18–44 кГц з амплітудою A=10–60 мкм; P_{cm} =10^5–10^6 Па.

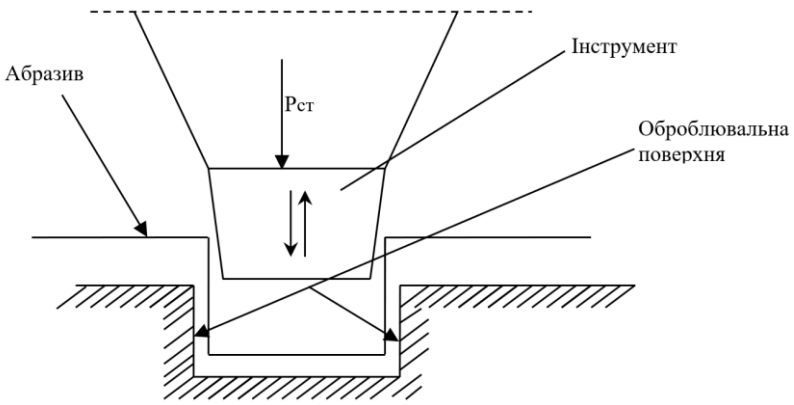


Рисунок 10.6 – Принципова схема вібромеханічного оброблення деталі

Різання. Застосовують для різання жароміцних, титанових тугоплавких сплавів.

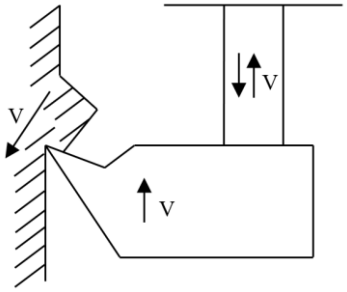


Рисунок 10.7 – Принципова схема вібраційного різання заготовки різцем

Зняття задирок. Для зняття задирок з дрібних деталей застосовується кавітаційно-абразивна ерозія.

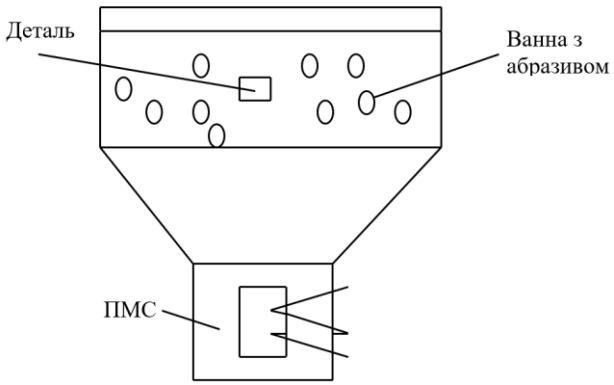


Рисунок 10.8 – Принципова схема установки
для зняття задирок з дрібних деталей

УЗ металізація і пайка. Для металізації та паяння металів, що важко металізуються, застосовують УЗ. При цьому у припої створюється кавітація, яка руйнує оксидну плівку і забруднення, покращуючи цим його адгезійні властивості.

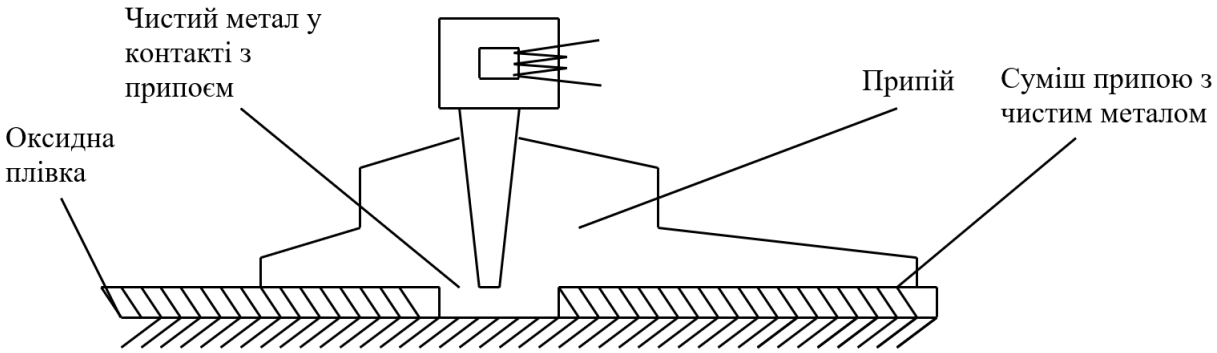


Рисунок 10.9 – Принципова схема установки
УЗ металізації та паяння деталей

УЗ зварювання. УЗ зварювання – спосіб з'єднання матеріалів у твердому стані за допомогою УЗ коливань. УЗ зварювання металів застосовується для з'єднання деталей однакових або різних матеріалів без їх розплавлення. Для цього деталі стискають і здійснюють УЗ коливання. При цьому у зоні контакту метал переходить у стан граничної еластичності або плинності.

Відбувається з'єднання деталей протягом 0,1–1 с.

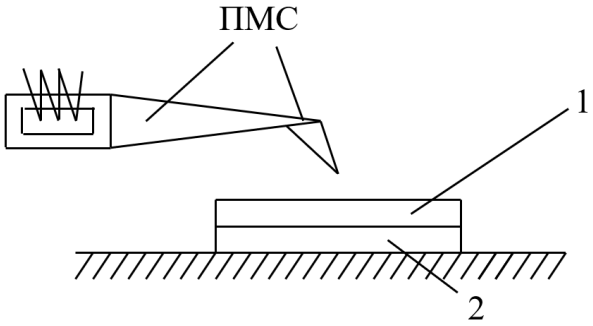


Рисунок 10.10 – Принципова схема установки УЗ зварювання:
1, 2 – зварювані деталі

Під час зварювання металів напрямок статичної сили перпендикулярний коливанням вібратора, а під час зварювання пластмас – збігається.

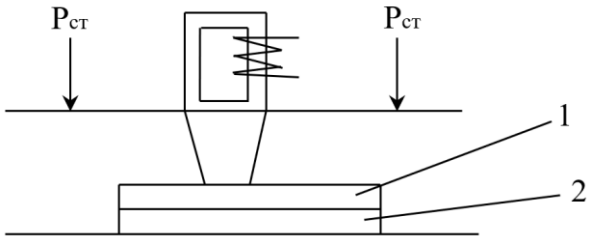


Рисунок 10.11 – Принципова схема установки УЗ зварювання під статичним навантаженням: 1, 2 – зварювані деталі

УЗ фільтрація газів. УЗ фільтрація здійснюється у спеціальних фільтрах. Поліпшується ступінь очищення завдяки створенню киплячого шару біля поверхні фільтра.

Осадження туманів. При створенні у середовищі з туманом електричного поля відбувається коагуляція дрібних крапель і випадання їх на поверхню землі.

Застосовуються різні свистки і сирени f = 10–20 кГц.

Розпилення аерозолів. Якщо на поверхню випромінювача подавати тонким шаром рідину, то вона відриватиметься у вигляді крапель діаметром 10–30 мкм, утворюючи аерозоль. Використовується в медицині для дезінфекції приміщень.

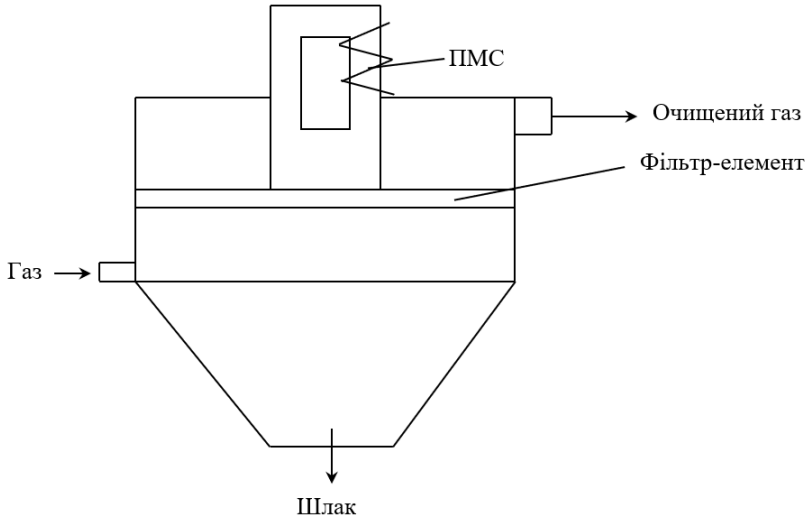


Рисунок 10.12 – Принципова схема установки вібраційного очищення газів

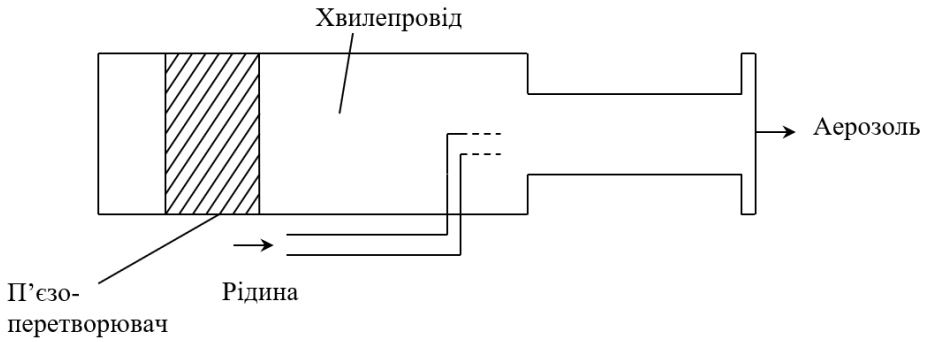


Рисунок 10.13 – Принципова схема установки розпилення аерозолів

Контроль якості продуктів. За швидкістю і поглинанням звуку в речовині можна оцінити її властивості. Для вимірювання цих показників в рідини використовують камери з перетворювачем та віддзеркалювачем.

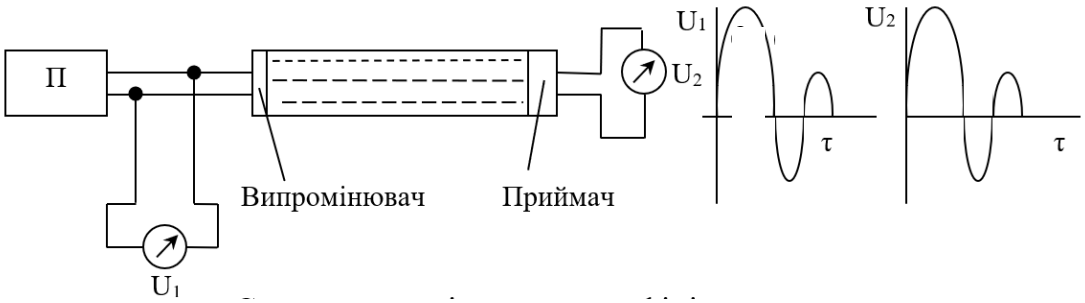


Рисунок 10.14 – Принципова схема установки
для вимірювання коефіцієнта поглинання

Застосовується для експрес визначення сухих речовин у соках і виноматеріалах, рідин, молока, вологовмісту деяких олій, а також для експрес-визначення якості та властивостей твердих продуктів неруйнівним методом використовують спеціальні пристрої для визначення швидкості звуку і поглинання для визначення зрілості та пошкодженості баштанних культур.

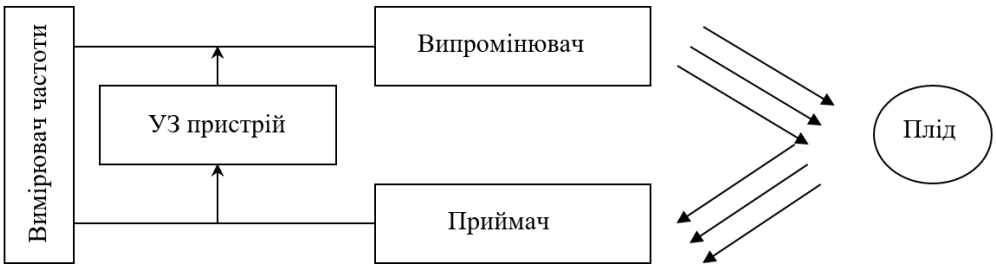


Рисунок 10.15 – Блок-схема установки для
вимірювання коефіцієнта поглинання

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 10

1 Дайте визначення ультразвуку та назвіть типові діапазони частот для технологічних застосувань.

2 Які основні механізми дії ультразвуку в рідинах?

3 Чим відрізняються п’єзоелектричні та магнітострикційні перетворювачі?

4 Які технологічні операції в АПВ доцільно інтенсифікувати ультразвуком?

5 Поясніть установку за рис. 10.1: як енергія генератора передається у робоче середовище?

6 Які параметри визначають результат обробки?

7 Які небажані ефекти можуть виникати при надмірній ультразвуковій дії?

8 Як оцінюють ефективність ультразвукового очищення або екстракції?

9 Які вимоги безпеки та шумозахисту актуальні для УЗ-установок?

10 Які фактори середовища впливають на кавітацію?

Тема 11. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ

План

11.1 Фізико-хімічні процеси, які відбуваються під дією струму

11.2 Обробка сільськогосподарської продукції електричним струмом

11.3 Електрохімічний захист від корозії

Вплив електричного струму на об'єкт може бути тепловим, фізико-хімічним і біологічним.

11.1 Фізико-хімічні процеси, які відбуваються під дією струму

Електроліз – сукупність окисно-відновних процесів, що відбуваються на електродах, занурених в електроліт, під час проходження постійного електричного струму.

Відповідно до закону Фарадея кількість речовини М, що виділяється на електроді прямо пропорційна кількості електрики q, що пройшла через електроліт:

$$M = k \cdot q, \qquad (11.1)$$

де k – коефіцієнт чисельно дорівнює масі речовини, що виділилася під час проходження через електроліт одиниці кількості електрики, називають ***електрохімічним еквівалентом речовини***.

Використовується при: нанесенні покриттів, отриманні різних речовин, електрофлотаційному очищенні рідин.

Електрокоагуляція – очищення рідини (води) від зважених найдрібніших частинок домішок; потрібне введення у неї коагулянтів (хімічних речовин, що дають змогу зваженим частинкам під час зіткнення злипатися. Суть методу полягає на отриманні коагулянтів за допомогою електролізу).

Коагулянт отримують під час анодного розчинення металу (як правило, Al і Fe) з подальшим утворенням відповідного гідроксиду ($Al(OH)_3$ або $Fe(OH)_3$).

Пластівці цих речовин практично нерозчинні у воді, своєю поверхнею вони поглинають зважені частинки і разом з ними випадають в осад.

Явище використовується для очищення стічних вод.

Оптимальна густина струму під час електричної коагуляції 10–40 $А/м^2$.

Перевага електрокоагуляції порівняно з традиційними способами:

1) простота;

2) економія реагенту;

3) можливість повної автоматизації.

Електроосмос – рух рідини через капіляр або пористу діафрагму при накладенні зовнішнього електричного поля.

Суть явища. На межі поділу двох фаз (твердої і рідкої) утворюється подвійний електричний шар. Перший шар являє заряди на поверхні твердого тіла, другий – на поверхні рідини. Подвійний електричний шар утворюється за рахунок хімічної взаємодії рідини і твердого тіла.

Якщо вздовж межі контакту докласти різницю електричних потенціалів, тоді електричний шар рідини рухатиметься і за рахунок тертя приводитиме в рух сусідні шари рідини. Так виникає рух рідини відносно твердої фази.

Явище використовується при електричному розшаруванні ґрунтів.

Електродіаліз – перенесення іонів під дією поля через іоноселективні мембрани. Такі мембрани мають високу концентрацію нерухомих іонів, хімічно зв’язаних каркасом мембрани. Тому вони відпускають іони тільки протилежних знаків. Виготовляються такі мембрани зі спеціальних іонообмінних матеріалів.

Суть електролізу можна показати на прикладі. Розглянемо трикамерний електролізатор (рис. 11.1).

У середню камеру подається солона вода. У двох камерах розташовані анод і катод. Під час проходження води в середній камері катіони (+) рухаються до катода через катіонову мембрану, а аніони – до анода через аніонову мембрану. У результаті у середній камері вода опріснюється, а в анодній підкислюється, і в катодній підлужується.

Явище використовується як метод для опріснення води.

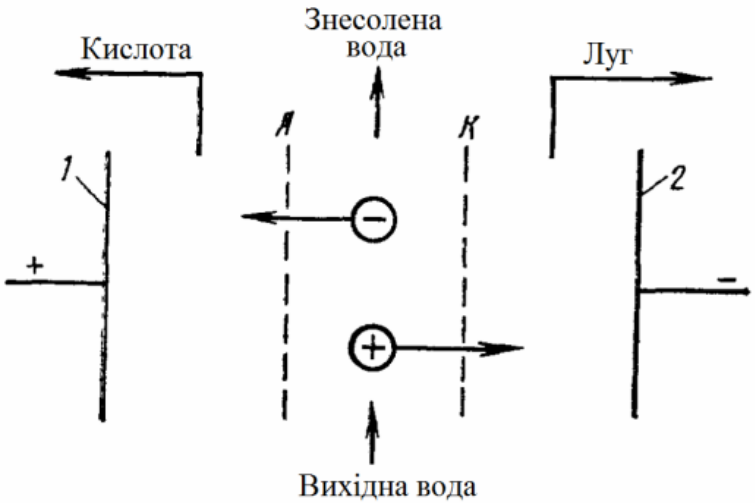


Рисунок 11.1 – Схема трикамерного електродіалізатора:
1 – анод; 2 – катод; А – аніонітова мембрана; К – катіонітова мембрана

11.2 Обробка сільськогосподарської продукції електричним струмом

Передпосівна обробка насіння. Насіння обробляють у конденсаторі з напруженістю електричного поля 100–400 кВ/м. Тривалість обробки 0,5–5 хв. Підвищення врожайності у деяких випадках досягає 10–15 %.

Вплив електричного поля на рослини. Залежно від виду рослини, величини струму і часу впливу, електричний струм може чинити як стимулювальний, так і пригнічувальний вплив. Будь-яка рослина має біоелектричний потенціал. Причому ростова точка має вищий потенціал, ніж коріння. Якщо до рослини прикладати напругу відповідної полярності біоелектричного потенціалу, то у допустимих межах відбувається стимуляція росту. В іншому разі відбувається пригнічення. Спосіб знайшов застосування для боротьби з гірчаком, що має розвинену кореневу систему, що досягає глибини 10–20 м, яка неприпустима механічним і хімічним методом боротьби.

Електроплазмоліз рослинної тканини. ***Плазмоліз*** – відшарування протопласта клітини від її оболонки, що призводить до загибелі клітини. Плазмоліз може бути досягнутий механічним, термічним, електричним та іншими методами.

Електроплазмоліз використовується у консервній промисловості для збільшення виходу соку з плодів, у сільському господарстві для прискорення сушіння трави. При цьому кількість корисних речовин у висушеній траві після

висушування практично не змінюється. Це пов'язано зі швидким виходом і випаровуванням вологи зі зруйнованої клітини.

В електроплазмолізаторах використовується струм промислової частоти. Матеріал пропускають через вальці на які подають змінну напругу. Ланцюг замикається через продукт, напругу на вальці подають через струмознімні кільця та щітки.

Запарювання соломи. Здійснюється струмом промислової частоти. При цьому у подрібнену солому додають 2 % содо-сольову суміш. Перетравлюваність такого продукту та її засвоюваність збільшується в 1,5–2 рази.

Розсолення ґрунтів. При розсоленні з верхнього шару ґрунту видаляють надлишок шкідливих солей, які пригнічують розвиток культурних рослин і знижують врожайність останніх або роблять його виростання взагалі неможливим.

Поширений метод розсолення ґрунтів – їх промивка прісною водою. Залежно від вмісту токсичних солей капітальні промивки тривають 1–3 роки і на 1 га потрібно 5–30 тис. $м^3$ прісної води.

Інтенсивність розсоленням ґрунту можна підвищити, пропускаючи через неї постійний електричний струм певної густини. При цьому за рахунок електроосмосу підвищується фільтраційна здатність засоленого ґрунту, а в результаті електролізу змінюється pH середовища, що збільшує розчинність солей. Крім того, під дією електричного поля істотно підвищується вологопровідність ґрунту. Ці та інші фактори посилюють витіснення розчинених токсичних солей з верхнього ґрунтового шару в нижні шари, звідки ці солі відводяться дренажною системою.

Багаторічні експерименти у лабораторних та польових умовах, проведені в нашій країні і за кордоном, показали, що при використанні для розсолення ґрунтів постійного електричного струму істотно скорочується період меліорації (в кілька разів), зменшуються витрати прісної води (приблизно у 2 рази) і прискорюється господарське освоєння ґрунтів.

У польових умовах електромеліорацію проводять так. Поле, яке підлягає розсоленню, попередньо готують до промивки, використовуючи звичайну технологію. Потім на виділених ділянках (чеках) монтують електроди (аноди і катоди) – найчастіше застосовують металеві труби або стрижні діаметром 35–70

мм. Глибина закладення катодів (3–5 м) як правило більша, ніж анодів (0,6–1,8 м). Це пояснюється бажанням хоча б частково поєднати напрямок електроосмотичного потоку води, що йде до катоду, з вертикальним напрямом гідравлічної фільтрації, зумовленої дією сили тяжіння. При вертикальному розташуванні електродів аноди і катоди часто розміщують рядами. Відстань між однойменними електродами в ряду становить зазвичай 10–20 м, між рядом катодів і поруч анодів – 20–110 м.

Після заповнення чеків водою лінії однойменних електродів підключають до випрямного пристрою. Необхідна напруга постійного струму становить десятки вольт, густина струму в ґрунті – 1–10 А/м^2, витрати електроенергії – 5–20 тис. кВт·год на 1 га.

Після того як розсолення закінчено і поле підсохло, демонтують електричну схему, витягають із ґрунту електроди та готують поле до посіву.

Отримання дезінфекційного розчину. На тваринницьких і комплексах воду, молочний посуд, доїльне та інше технологічне обладнання для знезараження обробляють розчинами, що мітять хлор, який отримують електролізом кухонної солі за технологією, описаною нижче.

Для цього використовують установку ЕДР-0,1, що містить ємність, у яку поміщений електролізний апарат. Перед початком роботи в ємність установки заливають 20 л 5%-ного розчину кухонної солі (1 кг солі на 20 л води). Потім на електроди електролізного апарата подають постійну напругу 24 В від випрямляча ВСА-6К (первинна напруга змінного струму 230 В). Через водний розчин кухонної солі NaC1 проходить струм, обумовлений переміщенням іонів Na+ і H+ до катода, а іонів C1$^-$ і OH$^-$ до анода. На катоді у результаті відновлення іонів H$^+$ виділяється газоподібний водень, а на аноді в результаті окиснення іонів C1$^-$ – газоподібний хлор. Іони Na$^+$, з'єднуючись з іонами OH$^-$, утворюють їдкий натр NaOH; хлор, розчиняючись у воді, утворює хлорнуватисту і соляну кислоти:

$$Cl_2 + H_2O \leftrightarrow HClO + HCl.$$

Хлорнуватиста кислота взаємодіє з їдким натром і утворюється гіпохлорит натрію NaOCl:

$$HClO + NaOH = NaClO + H_2O.$$

Хлорнуватиста кислота і гіпохлорит натрію, будучи сильними окислювачами, зумовлюють дезінфікуючу дію розчину. Дезінфікуючий розчин готують 1,5–2 год. Для отримання 1 кг активного хлору витрачається 8–10 кг кухонної солі і 5,5–7 кВт·год електроенергії. Потужність, що споживає установка, складає 350–600 Вт (постійного струму). Порівняно з використанням готових реагентів (рідкого хлору, хлорного вапна, гіпохлориту кальцію) знезараження за допомогою електролітичного гіпохлориту натрію, одержуваного на місці, дозволяє уникнути труднощів і витрат, пов'язаних з транспортуванням та зберіганням токсичних речовин.

Комплексне очищення та знезараження питної води на пасовищах, фермах і в селищах при добовому споживанні близько 10 м^3 може здійснюватися в електрохімічній установці УВ-0,5. Установка включає:

1) фільтр-електролізер для електрокоагуляції тонкодисперсних, у тому числі бактеріальних, забруднень;

2) гіпохлоритний електролізер для знезараження води;

3) срібний електролізер для консервування води.

Вода після обробки іонами срібла зберігає свої властивості більше місяця. Споживана потужність установки 2,5 кВт.

Опріснення води. В умовах сільськогосподарського виробництва, особливо на пасовищах, для опріснення води застосовують електродіалізні установки (табл. 11.1).

Таблиця 11.1 – Основні техніко-економічні дані деяких електродіаліз них установок сільськогосподарського призначення

Тип установки	Продук-тивність, м^3/год	Вміст солі у воді, г/л		Питомі витрати електроенергії, кВт·год/м^3
		початковий	кінцевий (опрісненої води)	
ЕОУ-НІІПМ-12	0,5	4	0,85	1,5
СЕХО-2	0,15	10	1	7
ЕОСХ-2М	3,5	7	1	2,3

Нанесення гальванічних покриттів у ремонтному виробництві.

Для відновлення зношених деталей, а також для захисту від корозії відновлюваних і знову виготовлюваних призначені гальванічні покриття. Процес нанесення гальванічних покриттів заснований на явищі електролізу і здійснюється у ванні, заповненій електролітом. Основний компонент електроліту – це з'єднання того металу, який повинен бути осаджений на деталь. У ванну занурюють електроди (аноди) і відновлювані деталі (катоди). При подачі на електроди постійної напруги (2–48 В) позитивно заряджені іони металу осідають на поверхні деталі.

З гальванічних процесів у ремонтному виробництві найбільш поширене хромування і залізнення. Густина струму при цих процесах становить кілька тисяч ампер на квадратний метр.

Переваги відновлення зношених деталей гальванічними покриттями перед наплавленням:

1) отримання покриття заданої товщини та одночасне відновлення великої кількості деталей;

2) відсутність термічного або механічного впливу на відновлювану деталь;

3) гарна керованість процесом.

Електрофлотація. ***Флотація*** – винесення частинок суспензії на поверхню рідини бульбашками газу, що знаходиться у рідині.

Залежно від способу отримання бульбашок газу флотація поділяється на напірну, хімічну, електричну.

За електричної флотації бульбашки отримують на аноді та катоді завдяки відновленню іонів водню і кисню під час електролізу.

При цьому для флотації використовують бульбашки кисню, тому що вони мають менший розмір (близько 20–80 мкм) і більшу кількість. В електрофлотаційних апаратах не припустимим є змішування H_2 і O_2, оскільки в цьому випадку утворюється гримуча суміш. Розмір бульбашки залежить від розміру дроту.

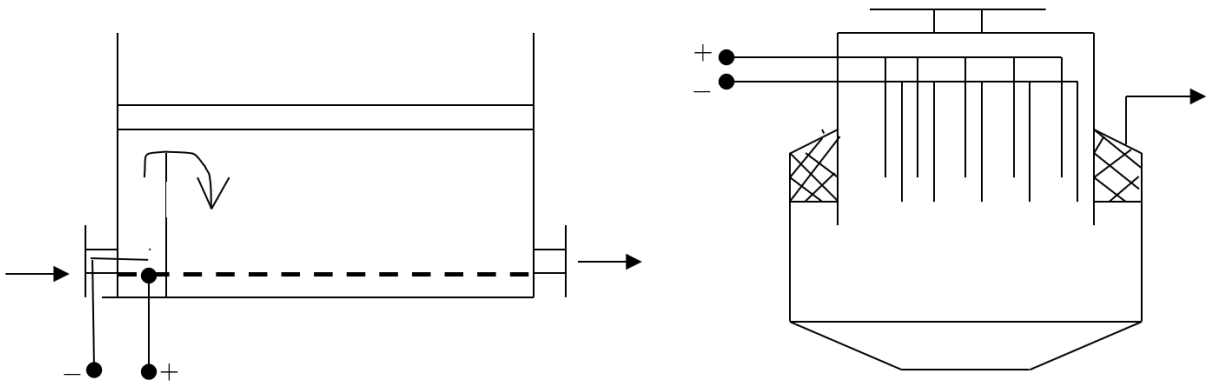


Рисунок 11.2 – Електрофлотаційна установка

11.3 Електрохімічний захист від корозії

Корозією металів називають руйнування металів унаслідок хімічної або електричної взаємодії їх із корозійним середовищем.

За механізмом протікання корозійного процесу розрізняють:

– ***хімічну корозію***, тобто таке руйнування металу з корозійним середовищем (розчином електроліту), за якого окиснення металу та відновлення окислювальної компоненти протікають одночасно і не супроводжуються протіканням електричного струму.

– ***електричну корозію***, тобто таку взаємодію металу з корозійним середовищем, за якої іонізація атомів металу та відновлення окиснювальної компоненти корозійного середовища протікають не одночасно, супроводжуються протіканням електричного струму та їх швидкості залежать від електродного потенціалу.

У сільському господарстві основними об’єктами, що піддаються корозійному руйнуванню, є трубопроводи зрошення, тому що в умовах інтенсивного поливного землеробства швидкість корозійних процесів дуже висока через високу періодичну вологість ґрунтів, гарну аерацію ґрунту, внесення добрив і отрутохімікатів.

Методи захисту підземних споруд від корозії поділяють на дві групи:

1) ***методи пасивного захисту***. Включають у себе різні пристрої та заходи, призначені для ізоляції підземних споруд від безпосереднього контакту з

ґрунтом і збільшення перехідного опору між ґрунтом і підземною спорудою, а також зменшення величини блукаючих струмів;

2) ***методи активного захисту***. Вони зводяться до створення такого електричного режиму підземної споруди, за якого корозія підземних споруд повністю припиняється.

До методів активного захисту належать три види електрохімічного захисту: катодний, протекторний та електродренажний.

В основі електрохімічного захисту лежить катодна поляризація трубопроводів до потенціалів, що забезпечують не протікання корозійних процесів, тобто до величини захисного потенціалу. Для електрохімічного захисту трубопроводів від ґрунтової корозії застосовують катодні станції (перетворювачі) і прожектори, а для захисту від корозії блукаючих струмів – електродренаж. До схеми станції кожного захисту входить джерело постійного струму, анодне заземлення, дренажні кабелі, регулятор струму поляризації. Струм зміщення катодного захисту поляризує споруду і створює захисний потенціал на ній. У результаті відбувається руйнування анодного заземлення, яке потрібно періодично відновлювати.

Прожектор виготовляється з металу з більш негативним електродним потенціалом, ніж метал підземної споруди. Встановлений у ґрунт і з'єднаний із підземною спорудою прожектор (гальванічний анод) руйнується і створює захисний потенціал на споруді. Нормальний електродний потенціал прожектора має бути меншим за потенціал матеріалу споруди (заліза).

Дія електродренажного захисту полягає у відведенні блукаючих струмів, що проникли у метали і споруди, розміщені під землею, у мережу зворотних струмів за рахунок підключення споруди через дренажний пристрій до елементів цієї мережі.

Величини захисного поляризаційного потенціалу для сталевого трубопроводу відносно мідносульфатного електрода такі: мінімально захисний – 0,85 В; максимально захисний – 1,1 В.

Катодний захист вирішує такі завдання:

– установлення кожної станції (перетворювача);

– влаштування анодного заземлення;

– будівництво і монтаж з'єднувальних ліній;

– будівництво і монтаж ліній живлення катодних станцій;

– підключення дренажних ліній до трубопроводу.

Станції встановлюють на зовнішніх цегляних або бетонних стінах будівель або огорож під час спорудження анодних заземлювачів магістралі або горизонтальних анодних заземлювачів. Для влаштування анодних заземлювачів із вертикальних анодів викопують свердловину на потрібну глибину.

Під час монтажу прожекторного захисту бурять свердловини або риють котловани, встановлюють прожектор у свердловину (використовується щогловий електрод), свердловину заповнюють активатором, підключають прожектор до трубопроводу.

Прожектор встановлюють у центрі свердловини і засипають ґрунтом, періодично поливаючи водою і ущільнюючи.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 11

1 Які процеси відносять до електрохімічної обробки в АПВ?

2 Сформулюйте зміст законів Фарадея у прикладному (інженерному) трактуванні.

3 Від яких факторів залежить вихід продуктів електролізу та енерговитрати?

4 Які матеріали електродів застосовують і чому їх вибір критичний?

5 Поясніть принципову схему установки електрохімічної обробки за рис. 11.1.

6 Які дані подано у табл. 11.1 і як їх використовують у розрахунках?

7 Для чого застосовують електрокоагуляцію і чим вона відрізняється від електролізу?

8 Які параметри води/розчину контролюють під час електрохімічної обробки?

9 Які небезпеки характерні для ЕХО та як їх зменшити?

10 Які вимоги до електроживлення та автоматизації електрохімічних установок?

Тема 12. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ. ЕЛЕКТРОГРАФІЯ

План

12.1 Електрографія

12.2 Електрокрапельні струменеві пристрої

12.1 Електрографія

Електрографія **–** процес відображення текстової або графічної інформації з використанням електричних полів.

Електрографічні друкарські пристрої використовуються як:

1) пристроїв копіювально-розмножувальної техніки;

2) друкувальних пристроїв для ПК, САПР.

В електродруці виділяють 2 напрямки:

1) електрофотографія;

2) електрокраплеструминна технологія.

Електрофотографія. В електрофотографії лежить принцип на основі властивості високоомного фотонапівпровідника змінювати свої властивості під дією світла. Процес отримання відображення включає такі чотири стадії:

1) Електризація напівпровідника. На поверхню напівпровідника, який наноситься на ньому тонким шаром на металеву підкладку, наносяться електричні заряди (наприклад, у полі корони). Час стікання зарядів із напівпровідникового шару залежить від питомого опору та діелектричної проникності напівпровідника.

2) Експонування шару. У процесі експонування під дією світла зменшується опір шару. Це призводить до розтікання зарядів з тих ділянок пластин, які були засвічені. Поверхневий заряд, що зупинився після експонування, утворює приховане електростатичне зображення.

3) Прояв прихованого електростатичного зображення. Проводиться за допомогою зарядженого порошку, із зарядом протилежним за знаком зарядів електризації. Частинки порошку осідатимуть у місцях з найбільшою щільністю

поверхневого заряду. У результаті на поверхні напівпровідникового шару утворюється порошкове зображення.

4) Перенесення шару на папір (або іншу підкладку) і його фіксація. Як правило переноситься незначна частина порошку, що дає змогу отримувати кілька копій. Фіксацію найчастіше проводять термічно.

Здебільшого в електрофотографії використовується нанесення зарядів на підкладку у полі коронного розряду.

Проявлення прихованого зображення найчастіше здійснюється методом каскадного проявлення. Розглянемо суть методу.

Каскадний проявник складається з 2 компонентів: грубозернистого носія і дрібнодисперсного проявного порошку. Ці компоненти повинні мати властивість електризації проявного порошку зарядом, протилежним заряду електризації шару фотонапівпровідника. Проявлення полягає у тому, що частинки тонера відриваються від носія і прикріплюються до підкладки. Суть перенесення порошкового зображення полягає в тому, що частинки тонера, з якого складається видиме зображення, переносяться електростатичним полем на папір. Для цього на папір, покладений на фотошар, наносять заряди, що збігаються за знаком з початковим зарядом шару.

Як матеріали використовуються фотонапівпровідники з питомим опором 10 Ом·м і більше. При освітленні опір шару має зменшуватися в 1000–100000 раз.

Використовують напівпровідники: 1) сірка; 2) аморфний селен; 3) сплав селену і телуру.

Вітчизняні апарати: ЕР-12Р1 (продуктивність 20 копій/хв формату А4).

12.2 Електрокрапельні струменеві пристрої

У цих пристроях використовується принцип управління струменем монодисперсних заряджених крапель (за аналогією з електронно-променевою трубкою).

Емітер крапель 1 створює однорідний прямолінійний краплинний струмінь, який отримає принципову або іонну зарядку у зарядному пристрої. Блок керування відхиляє струмінь за однією або двома координатами, перериває його та очищає від крапель меншого розміру. Емісія крапель, заряду та керування синхронізується.

Під час струменевого друку емісія крапель здійснюється імпульсним тиском, високим тиском та електростатичним полем.

Швидкість друку для таких систем може досягати 1500 знаків на секунду.

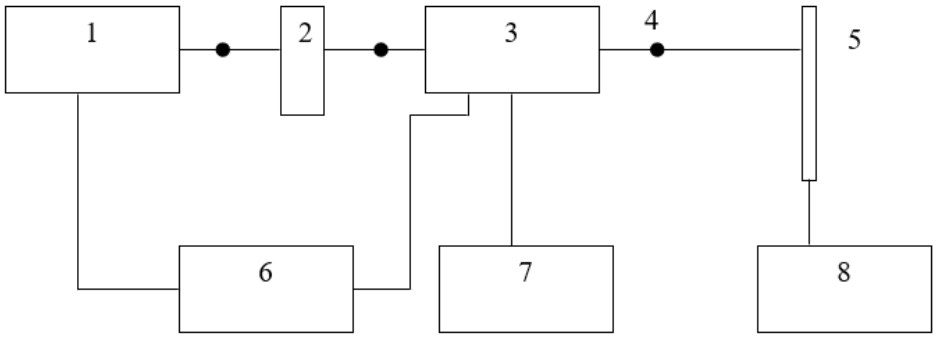


Рисунок 12.1 – Узагальнена структурна система
електрокраплеструминного пристрою:
1 – емітер крапель; 2 – зарядний пристрій; 3 – блок управління струменем;
4 – крапля; 5 – папір; 6 – синхронізуючий пристрій; 7 – задаючий генератор;
8 – механізм приводу

Рідина (фарба, чорнила) подається у генератор (1) (див. рис. 12.2) із сопла якого вона виходить у вигляді тонкого струменю монодисперсних крапель.

Під час проходження струменя крапель через зону дії електростатичного поля, яка створює електроди зарядки (2), кожній із крапель дається однаковий електричний заряд.

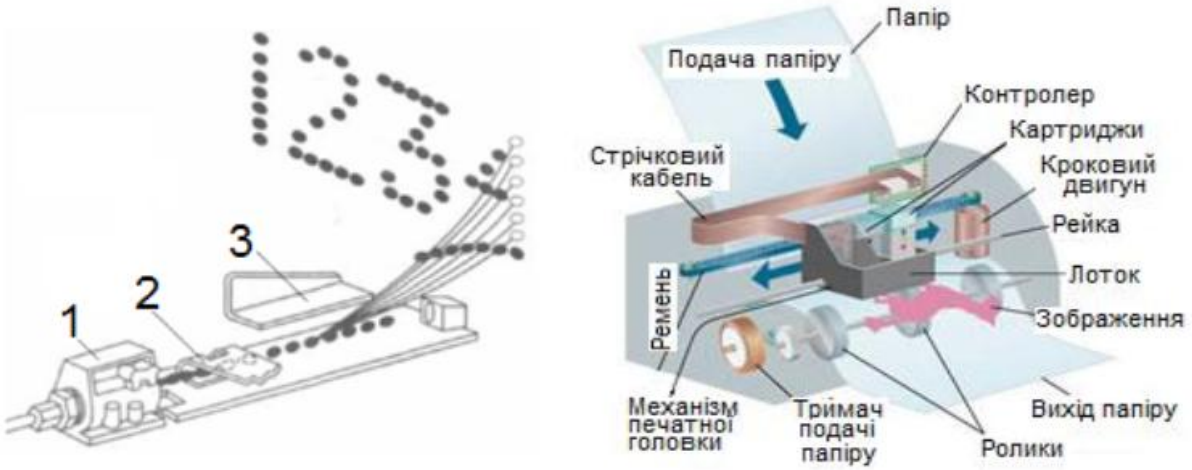


Рисунок 12.2 – Електроустановки та принтер для друку:
1 – генератор монодисперсних крапель; 2 – електроди зарядки;
3 – електроди керування

Після цього заряджені краплі потрапляють у зону дії електричного поля електродів керування 3. Ці електроди створюють імпульси електричного поля які відповідні спеціальної програми. Під дією імпульсів електричного поля кожній з електрично заряджених крапель задається певний кут відхилення та забезпечується своя траєкторія руху. На поверхню виробу наноситься маркування внаслідок визначених програмою розміщень на ній крапель рідини.

Такі пристрої широко застосовуються під час маркування різних виробів, особливо тих, що виготовляються на високотехнологічних лініях: продуктів харчування; проводів і кабелів; стрічок різних матеріалів тощо.

Ці установки легко монтуються в автоматичні технологічні лінії та забезпечують нанесення маркування без її зупинки. Приклад маркувального комплексу наведений на рис. 12.3. До базового складу комплексу входить принтер і транспортний пристрій.

Технічні дані комплексу наведені в таблиці 12.1.

Таблиця 12.1 – Технічні характеристики маркувального комплексу

Параметри	Тип PRO		
	Xs2	Xs3	Xs4
Максимальний робочий тиск рідини, ат	7	7	7
Максимальний робочий тиск повітря, ат	7	7	7
Вага розпилювача, г	667	711	788
Довжина розпилювача, см	21,8	24,6	28,2
Діапазон опору краски, мОм·см	7–150	7–∞	25–∞
Максимальна вихідна напруга, кВ	–	60	85
Максимальна робоча температура рідини, °С	48,8	48,8	48,8

Отже, на цей час існує велика кількість електронно-іонних установок, які виконують різноманітні функції. Вони постійно модернізуються, що дає можливість використовувати їх у різноманітних середовищах.

Рисунок 12.3 – Маркувальний комплекс

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 12

1 Що таке електрографія та які її основні різновиди розглядаються в темі?

2 Опишіть основні стадії електрофотографічного процесу.

3 Яку роль відіграє електричне поле у перенесенні та закріпленні тонера?

4 Які матеріали та властивості фотопровідників є важливими для електрографії?

5 Поясніть схему електрофотографічного пристрою за рис. 12.1.

6 У чому суть електростатичного перенесення зображення та які чинники визначають якість?

7 Що таке електроструменевий друк і які його переваги та обмеження?

8 Як здійснюється заряджання та відхилення крапель у струменевих системах (за рис. 12.2)?

9. Які параметри визначають точність позиціювання крапель?

10 Які типові дефекти електрографії та їх фізичні причини?

Тема 13. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

План

13.1 Електроаерозольна обробка

13.2 Інші види використання силової дії електричних полів

13.1 Електроаерозольна обробка

Електронно-іонними технологіями називаються такі електротехнології, в яких використовується дія електростатичного поля високої напруженості на речовину, що знаходиться у твердому, рідинному або газоподібному стані, з метою зміни її фізичних та/або хімічних властивостей, і що досягається в основному за рахунок цілеспрямованого розподілу її складових частин.

Робота електронно-іонних технологічних установок базується на використанні таких явищ як:

– ***електрофорез*** – рух частинок, що знаходяться у завислому стані у рідинному або газовому середовищі, під дією електростатичного поля;

– ***електросепарація*** (електростатичне збагачення) – відокремлення від суміші необхідних компонентів у результаті дії сильного електростатичного поля на електрично заряджену диспергована суміш;

– ***електроосмос*** – рух рідини через капіляри і пористі діафрагми під дією електростатичного поля.

Під час проходження всіх цих явищ під дією електростатичного поля відбувається переміщення не окремих іонів, а мікрочастинок речовини, які складаються із порівняно великої кількості молекул.

Для пояснення процесів, що відбуваються в електронно-іонній установці, розглянемо рис. 13.1 а, на якому зображені два коаксіальні електроди – коронувальний 1 і осаджувальний 2. Діаметр *d* коронувального електрода значно менший ніж діаметр *D* осаджувального електрода.

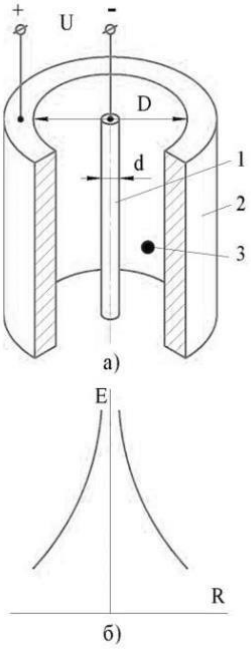


Рисунок 13.1 – Для пояснення принципу дії електронної установки:
а – структурна схема; б – графік розподілу напруженості електричного поля:
1 – коронувальний електрод; 2 – осаджувальний електрод;
3 – частинка твердого тіла

Після підключення електродів до джерела живлення постійним струмом у середовищі (наприклад, повітрі) між електродами виникає різко неоднорідне електростатичне поле. Графік розподілу напруженості E електричного поля між електродами зображений на рис. 13.1 б.

Під дією електростатичного поля буде відбуватися напрямлене переміщення заряджених частинок, які знаходяться у повітряному середовищі між електродами, і проходитиме струм по замкненому електричному колу.

Сила струму буде залежати від кількості заряджених частинок у повітряному середовищі і від величини напруги, що прикладена до електродів. Зі збільшенням напруги збільшується сила струму. Оскільки повітря є діелектриком, то при малих значеннях напруги сила струму буде малою. Але при певному збільшенні напруги між електродами виникає коронний розряд – неповний електричний пробій газового середовища між електродами.

Початкову напруженість E_0, В/м, електричного поля біля коронувального електрода, при якій виникає регулярний коронний розряд у середовищі повітря, визначають за формулою:

$$E_0 = 10,3\left(1 + \frac{0,298}{\sqrt{\rho_0 r}}\right), \qquad (13.1)$$

де r – радіус коронувального електрода, м; $r = d/2$;

$\rho_0 = 3,86$ – питома густина повітря.

Оскільки електричне поле в міжелектродному проміжку різко неоднорідне, то виникають дві різні зони. Зона навколо коронувального електрода заповнена позитивно і негативно зарядженими іонами та електронами. Друга зона охоплює простір між короною та осаджувальним електродом. Вона заповнена переважно негативно зарядженими іонами – основними носіями зарядів при коронному розряді, і частково – негативно зарядженими електронами.

Якщо в газовому проміжку між електродами в другій зоні помістити частинку 3 (наприклад, частинку твердого тіла), що знаходиться у завислому стані, то на неї діятиме електростатичне поле. Ця дія буде проявлятися тим, що на твердій частинці накопичуватимуться негативні електричні заряди за рахунок осідання на ній іонів та електронів. Негативно заряджена частинка під дією поля спрямовується до осаджувального електрода, що має позитивний потенціал.

Величина граничного заряду $Q_{ГР}$, *Кл*, частинки, при якому подальше накопичення електричного заряду закінчується, визначається за формулою:

$$Q_{ГР} = 4\pi\varepsilon_0\left(1 + 2\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\right)E_X a^2, \qquad (13.2)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-2}\,Ф/м$);

ε – відносна діелектрична проникність газового середовища, Ф/м;

E_X – напруженість електричного поля в точці «*X*» розміщення твердої частинки, В/м;

a – радіус твердої частинки, м.

13.2 Інші види використання силової дії електричних полів

Аерозолями називають системи, що складаються з твердих або рідких частинок, зважених у газоподібному середовищі.

Розмір частинок від 1 нм до 100 мкм.

За високої дискретності загальна площа поверхні матеріалу велика. Тому матеріал в аерозольному стані має високу активність.

У сільському господарстві аерозолі використовують для дезінфекції приміщень, боротьби зі шкідниками та хворобами культурних рослин, обробки отрутохімікатами, профілактики та лікування тварин, фарбування виробів, нанесення порошкових покриттів тощо.

13.2.1 Механізм розпилення

Процес утворення частинок із високою дисперсністю називається ***розпиленням***.

Для того щоб розірвати рідину, необхідно докласти до неї деяке розтягуюче напруження, що подолає силу поверхневого натягу. Отже, сила, яка змушує рідину бути «суцільною», визначається величиною поверхневого натягу.

Теоретично рідину можна розірвати, якщо до неї прикладено розтягувальне зусилля, виражене у одиницях тиску:

$$P_p = \frac{2\sigma}{R}, \tag{13.3}$$

де σ – поверхневий натяг, $Н/м$;

R – відстань на якій діють молекулярні сили, *м*.

Для води теоретична міцність теоретична міцність

$$P = \frac{2 \cdot 72}{2 \cdot 10^{-10}} = 72 \cdot 10^{10}\, Па,$$

де $\sigma_в = 72\, Н/м$; $R = 2 \cdot 10^{-10}\, м$ – подвійна відстань між молекулами води.

Величина теоретичної міцності води дуже велика. Однак на практиці міцність води на розрив набагато менша. Це пов’язано з неоднорідністю

структури реальної рідини, в якій завжди є домішки та інші центри можливих розривів.

Розглянемо процес розпилення в електричному полі. Крапля рідини, що утворюється на виході з розпилювача, зростає доти, поки електричні сили, що діють на неї, не перевищать сили поверхневого натягу.

Відбувається порушення стійкості поверхні на кінчику краплі і, як наслідок, викид стиснутої цівки, яка подрібнюється за рахунок електричних і механічних сил.

На процес розпилення впливають такі чинники: поверхневий натяг, в'язкість рідини, витрата рідини, напруженість електричного поля, провідність рідини.

Величина напруженості електричного поля знаходиться у межах, які визначаються як:

1) нижня межа – величиною поверхневого натягу;

2) верхня межа – появою коронного розряду на кромці розпилювача, який перешкоджає зростанню напруженості поля біля поверхні краплі.

В електричному полі погано розпорошуються рідини з поверхневим натягом, більшим ніж $(4–5)\cdot 10^3\, Н/м$.

Вплив електропровідності. Рідини з питомим опором $\rho_y = 10^8 Ом\cdot м$ не розпорошуються в електричному полі, оскільки ускладнене підтікання заряду до кінчика краплі. При опорі менше $\rho_y = 10^2 Ом\cdot м$ розпилення так само ускладнене через значне збільшення об'ємного заряду частинок рідини, який зменшує напруженість поля на кромці розпилювача.

В'язкість рідини так само впливає на розпилення. Рідини з в'язкістю понад 0,07 *Па с* практично не розпилюються (в'язкість води 0,01 *Па с*)

13.2.2 Способи розпилення та конструкції розпилювачів

Існують 2 різні системи розпилення:

1) електростатична;

2) механічна з подальшим заряджанням крапель.

До ***електростатичних*** належать лоткові щілинні розпилювачі.

Розпилення відбувається на кромці похилого лотка або на краю пластини, що поміщається на виході зі щілини. Такі розпилювачі використовуються на великих поверхнях плоскої форми. Витрата рідини $1\frac{г}{(см^2 \cdot хв)}$.

У таких розпилювачах процес заряджання крапель і їх розпилення поєднані у часі. Для великих продуктивностей застосовують обертові електростатичні розпилювачі продуктивністю 30–50 г/хв.

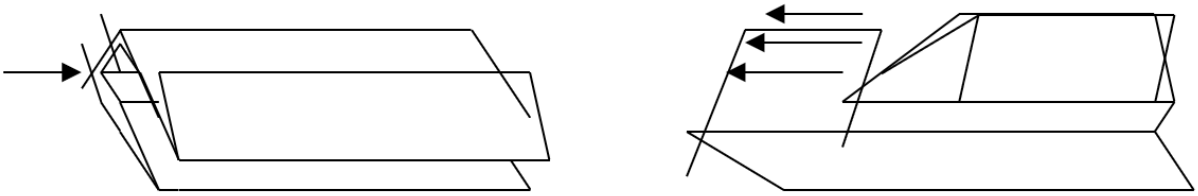


Рисунок 13.2 – Лотковий і щілинний розпилювачі

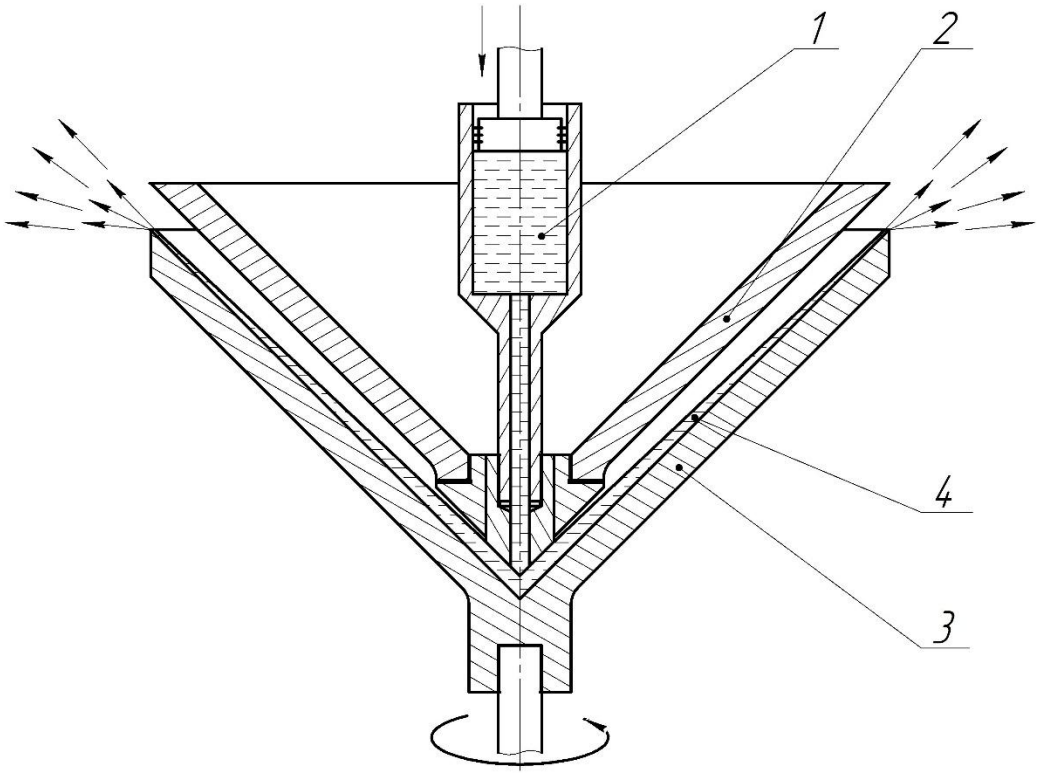


Рисунок 13.3 – Обертовий відцентровий розпилювач з індукційною зарядкою:
1 – шприц; 2 – конічний високовольтний електрод, що обертається;
3 – заземлений корпус, що обертається; 4 – плівка рідини

Розпилювач працює так: електропровідна рідина безперервно витікає зі шприца 1 і надходить до центру заземленого корпусу 3, що обертається. Рідина розтікається по поверхні електрода тонкою плівкою 4 і рухається під дією відцентрових сил до периферії конуса. У місці із заземленим електродом обертається високовольтний електрод 2, який індукує на поверхні рідини електричний заряд, що виноситься краплями з кромки електрода. Протилежні заряди йдуть у землю. Швидкість обертання електродів 1,5–3 тис об/хв, у той самий час для механічних розпилювачів значно вища швидкість – 20–40 тис об/хв.

Переваги:

1) рівне і гладке покриття;

2) малі втрати.

Недоліки:

1) низька продуктивність.

Друга система розпилення (***механічна з подальшим заряджанням крапель***) поєднує механічне розпилення з подальшим заряджанням і рухом частинок. У цьому випадку електричні сили не беруть участі у розпиленні рідини.

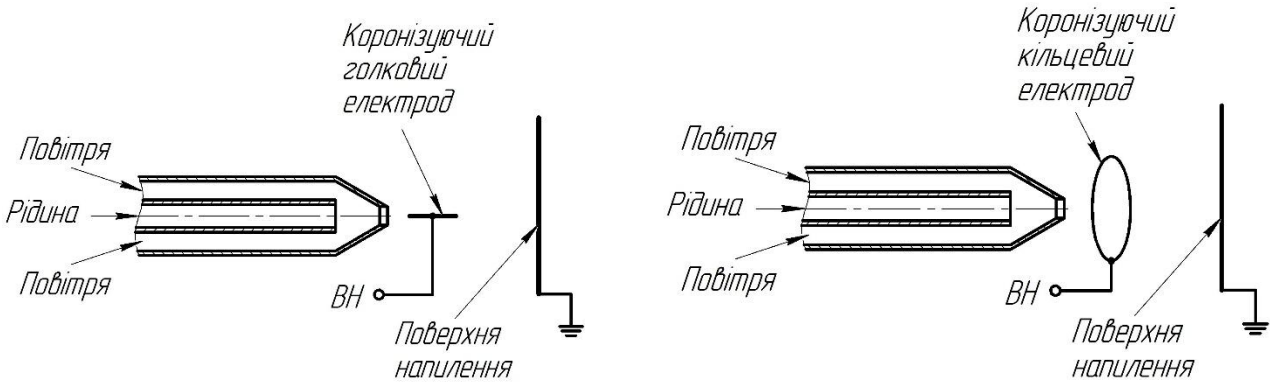
Застосовуються такі системи електричного розпилення фарби: відцентрова, пневматична, безповітряна.

У відцентрових розпилювачів на кромці диска або чаші, що обертається з великою швидкістю 20–40 тис об/хв. Внаслідок дії відцентрових сил рідина відривається з великою швидкістю від розпилювача і під час взаємодії з навколишнім повітрям розбивається на краплі.

При безповітряному розпиленні краплі прискорюються відносно нерухомого повітря завдяки тому, що рідина подається до розпилювача під великим тиском (120 *Па*).

При пневматичному розпиленні подрібнення рідини відбувається під дією стисненого повітря.

Заряджання крапель відбувається під час руху крапель через поле коронного розряду.



а *б*

Рисунок 13.4 – Види розпилювачів:
а – з голковим коронізуючим електродом;
б – із кільцевим коронізуючим електродом

Переваги електромеханічних розпилювачів:

1) велика продуктивність;

2) гарне заповнення порожнин.

Недоліки:

1) невеликий ступінь зарядки частинок, а тому більші втрати рідини (фарби, наприклад) на 20–30 %.

13.2.3 Покриття лаком в електричному полі

Звичайний спосіб розпилення фарби стисненим повітрям призводить до великих втрат лакофарбового матеріалу, особливо для дрібних деталей, що становлять 60–70 %.

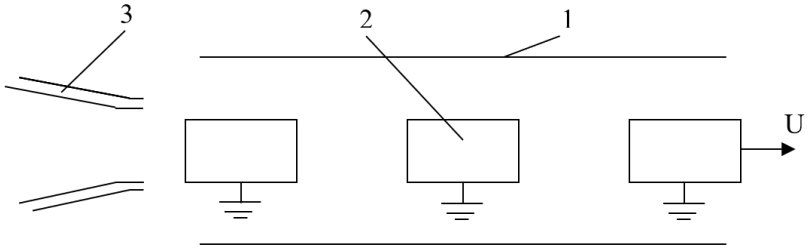


Рисунок 13.5 – Фарбування деталей в електростатичному полі:
1 – коронувальна сітка; 2 – деталь; 3 – розпилювач

Коронізуюче електромагнітне поле виконано у вигляді сітки з розміром комірки 20 см, дріт з ніхрому 0,3 мм, напруга корони 100 кВ, відстань від електрода до деталі не менше 25 см.

Деталі підвішуються і поміщаються у поле коронного розряду, при цьому вони можуть повертатися для поліпшення якості. Якщо деталь виконана з непровідного матеріалу, під неї поміщається заземлений металевий лист.

13.2.4 Нанесення порошкового покриття

Для отримання технологічних, захисних і декоративних покриттів використовують різні полімерні матеріали. Полімерний порошок або утворює суцільне покриття при зіткненні з нагрітою поверхнею, або наноситься на холодну, а потім нагрівається.

У першому випадку проводяться вібровихрові напилення, у другому напилення проводиться в електричному полі й утримування порошку здійснюється за рахунок електричних сил. Електричне напилення дає змогу отримувати більш високу якість покриття.

Існує 2 способи нанесення: в електричному киплячому шарі та за допомогою розпилювачів.

13.3 Інші види використання силової дії електричних полів

Керування витратою сипучих матеріалів. Використовується в гравітаційному живильнику насіння. Насіннєвий матеріал надходить у міжелектродний простір. Насіння орієнтується вздовж поля, утворюючи ланцюжки. При цьому збільшується тертя в об’ємі сипучого матеріалу. Переваги методу – точність керування малими витратами.

Передпосівна та передпосадкова обробка насіннєвого матеріалу.

Передпосівна обробка в деяких випадках здатна підвищити врожайність на 5–20 % Крім цього, підвищується якість продукту, прискорюється розвиток рослин.

Напруженість поля має бути 200–1000 кВ/м тривалість 2–3 с.

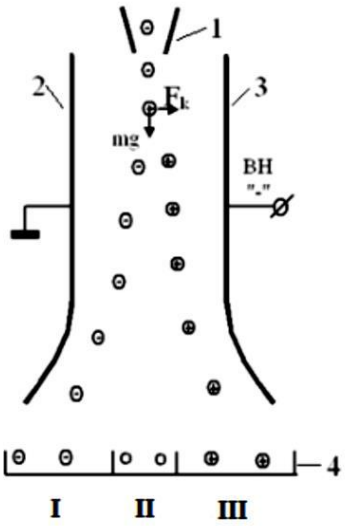


Рисунок 13.6 – Камерний електростатичний сепаратор зерна:
1 – дозатор; 2 – заземлюючий електрод; 3 – високовольтний електрод;
4 – приймач від сепарованого матеріалу I – негативно заряджене зерно;
II – незаряджене зерно; III – позитивно заряджене зерно)

Штучна іонізація повітря в приміщенні. У атмосфері безперервно відбувається іонізація повітря. Вона визначається впливом на молекули повітря космічних променів, радіоактивних випромінювань речовин у повітрі, воді, ґрунті тощо.

Залежно від рухливості атмосферні іони ділять на дві групи: легкі $k > 10^{-5} \frac{м^2}{В \cdot с}$ і важкі $k < 10^{-5} \frac{м^2}{В \cdot с}$

Легкий іон являє собою іонізовану молекулу, оточену групою нейтральних молекул водяної пари.

Важким іоном називають аерозольну частинку з електричним зарядом.

В атмосферному повітрі (чистому) міститься до 1000 $\frac{мг}{см^3}$ легких іонів і кілька 1000 різного знаку.

На людей позитивну впливають легкі негативні іони.

У приміщеннях особливо тваринницьких відчувається нестача легких негативних іонів, тому у цих приміщеннях здійснюють штучну іонізацію.

Для вимірювання концентрації іонів використовують лічильники іонів аспіраційного типу. У них повітря продувають через конденсатор.

При цьому струм конденсатора дорівнює концентрації іонів.

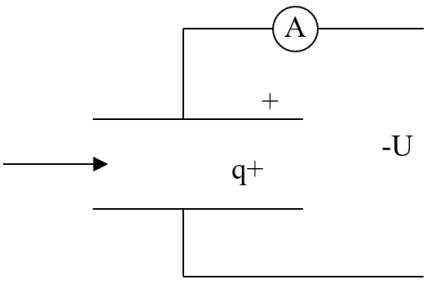


Рисунок 13.7 – Лічильник іонів аспіраційного типу

Електричне поле Землі

Електричне поле Землі – це глобальне квазістатичне електричне поле, що формується в системі «земна поверхня – атмосфера – іоносфера» та є складовою планетарного електричного кола. Воно зумовлене розподілом електричних зарядів у нижніх і верхніх шарах атмосфери, електричною провідністю повітря, а також процесами іонізації, що підтримуються космічним випромінюванням і сонячною радіацією.

У спокійних метеорологічних умовах вертикальна складова напруженості електричного поля поблизу земної поверхні спрямована донизу і становить у середньому 100–150 В/м. Це поле виникає через наявність від'ємного заряду на поверхні Землі та додатного заряду в іоносфері на висотах приблизно 60–100 км. Між цими шарами формується потенціальна різниця порядку сотень кіловольт (близько 250–300 кВ), що підтримується глобальною грозовою діяльністю.

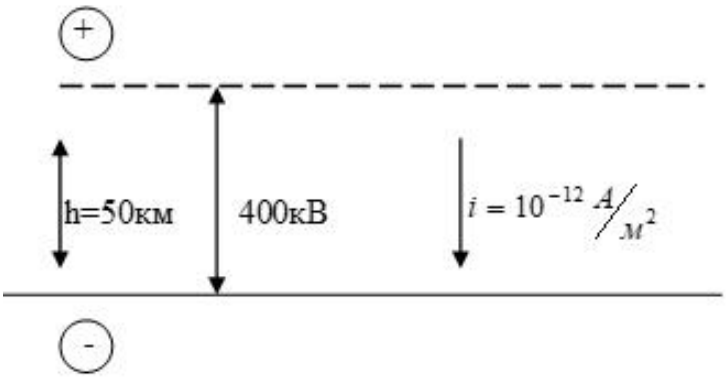


Рисунок 13.8 – Електричне поле Землі

Глобальне електричне коло функціонує як система безперервного струму, у якій грозові хмари виконують роль генераторів електричного струму, заряджаючи іоносферу позитивно, тоді як у ясну погоду відбувається витік струму провідності через атмосферу до земної поверхні. Струм провідності має густину порядку 1–5 пА/м² і визначається електропровідністю атмосфери, яка зростає з висотою внаслідок підвищення концентрації іонів. Загальний струм, що досягає Землі, складає 1800 А, а потужність 120–700000 кВт.

Електричне поле Землі є неоднорідним у просторі та змінним у часі. Його параметри залежать від метеорологічних умов, часу доби, широти, сонячної активності та локальних електричних процесів у атмосфері. Особливо значні відхилення спостерігаються під час грозових явищ, коли напруженість поля може досягати десятків кіловольт на метр, що зумовлює виникнення коронних розрядів і блискавок. Наприклад, за даними японських дослідників о 19:00 за японським часом напруженість електричного поля Землі досягає максимуму E_{max} = 120 В/м, а о 3 ранку – мінімуму E_{min} = 80 В/м.

З погляду електротехніки та геофізики електричне поле Землі має важливе прикладне значення. Воно впливає на роботу ліній електропередачі великої протяжності, високовольтного обладнання, систем заземлення та вимірювальних приладів. Також його враховують при проєктуванні грозозахисту, електромагнітної сумісності та дослідженнях атмосферної електрики.

Дослідження електричного поля Землі здійснюють за допомогою електростатичних флюксметрів, електрометрів і польових млинів, що дозволяє визначати напруженість поля та варіації потенціалу в часі. Отримані дані застосовуються для моделювання глобального електричного кола, прогнозування грозової активності та аналізу взаємодії між атмосферними, геофізичними та космічними процесами.

Отже, електричне поле Землі є фундаментальним природним явищем, яке відображає електричну взаємодію між поверхнею планети, атмосферою та іоносферою, і відіграє суттєву роль у фізиці атмосфери, електроенергетиці та системах техногенної безпеки.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 13

1 Що розуміють під електронно-іонною технологією та які її завдання в АПВ?

2 Як утворюється електроаерозоль і які фактори визначають заряд частинок або крапель?

3 Чим відрізняється електростатичне напилення від механічного розпилення?

4 Які конструкції коронувальних електродів застосовують і як вони впливають на процес заряджання?

5 Поясніть схему установки за рис. 13.1.

6 Які фактори зовнішнього середовища впливають на стабільність коронного розряду?

7 Які показники оцінюють для контролю якості напилення або обробки електроаерозолем?

8 Які переваги електроаерозольного нанесення препаратів у рослинництві?

9 Які ризики безпеки характерні для електронно-іонних установок і які захисти застосовують?

10 Що демонструє рис. 13.6 і як його можна інтерпретувати з позицій руху заряджених частинок?

Тема 14. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ. УСТАНОВКИ СЕПАРАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ

План

14.1 Класифікація сепараторів

14.2 Принципи дії сепараторів по виду розподілу

14.3 Застосування електричних сепараторів у сільському господарстві

14.1 Класифікація сепараторів

Сепарація – розділення сумішей. Пристрої, призначені для розділення сипучих матеріалів в електричних полях, отримали назви електросепараторів.

14.1 Класифікація сепараторів

Сепаратори класифікуються за такими ознаками:

1. **За видом електричного поля:**

1) електростатичні;

2) коронні;

3) зі змінним полем;

4) комбіновані.

2. **За конструкцією:**

1) камерні;

2) барабанні;

3) транспортні тощо.

3. **За видом розділення матеріалу:**

1) розділення за провідністю;

2) розділення за ступенем електризації тертям;

3) розділення, засноване на піроелектричному ефекті (під час нагрівання частинки можуть електризуватися);

4) розділення за діелектричною проникністю;

5) розділення, засноване на відмінності мас частинок.

В електросепараторах частинки матеріалу розділяють за сукупністю фізичних (у т. ч. електричних) властивостей. Ця сукупність властивостей показується ознакою **розділюваності**. Вона може бути ***регульованою***, якщо ступінь впливу властивостей, що входять до неї, на процес розділення залежить від параметрів режиму сепаратора, і ***нерегульованою***, якщо такої залежності немає. Крім того, ознака розділюваності може бути ***статичною*** і ***динамічною*** – залежно від часу перебування матеріалу в електричному полі.

14.2 Принципи дії сепараторів за видом розділення

14.2.1 Розділення електризацією тертям

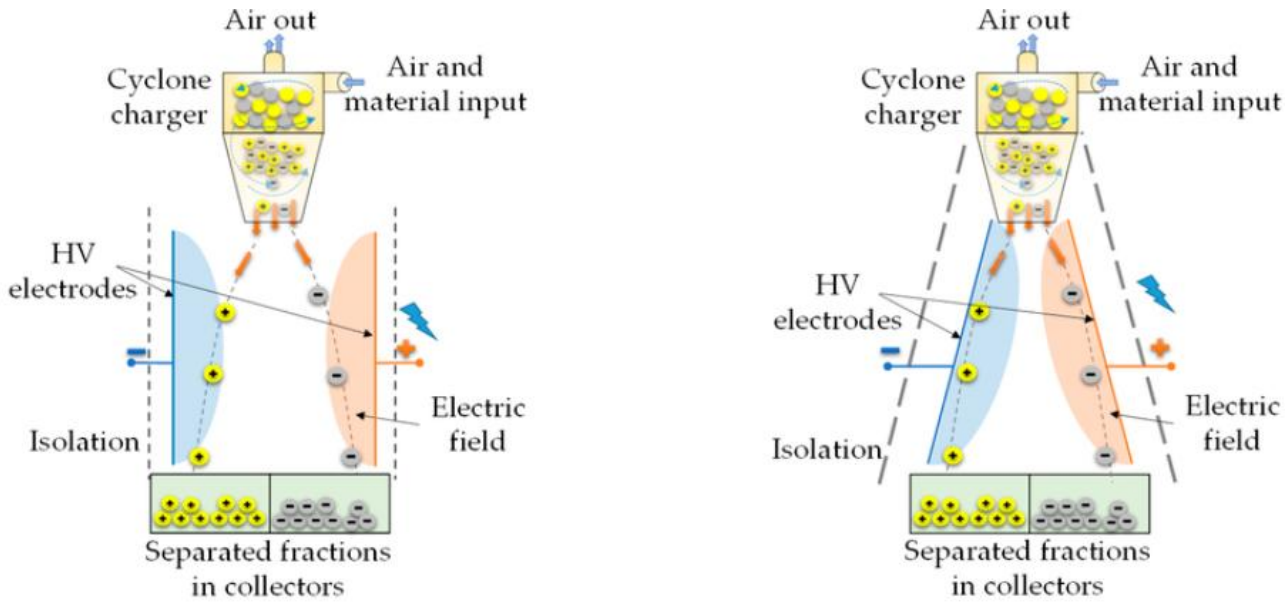


Рисунок 14.1 – Трибоелектричний сепаратор

Принцип дії: унаслідок тертя двох різних матеріалів один по одному на них отримують відмінні за величиною, а іноді і за знаком, заряди. Ця властивість використовується у ***трибоелектричних сепараторах***.

14.2.2 Розділення за діелектричною проникністю

Принцип дії. У цьому способі використовується сила, що діє на незаряджену діелектричну частинку у неоднорідному електричному полі. Якщо діелектрична проникність частинки більша ніж середовища, тоді частинка

втягується у ділянку з найбільшою електричною напруженістю, якщо навпаки – виштовхується. Напрямок руху частинок можна змінювати змінюючи діелектричну проникність середовища.

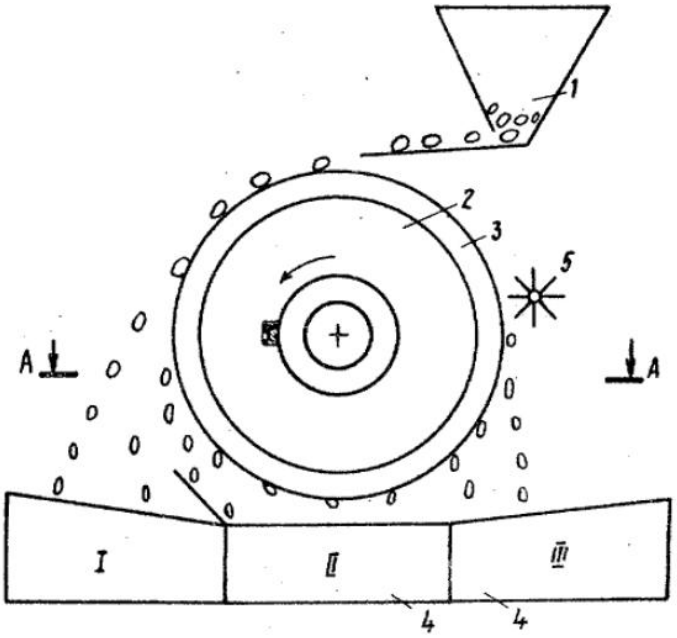


Рисунок 14.2 – Діелектричний барабанний сепаратор:
4 – приймальний бункер; 5 – щітка; 1 – завантажувальний бункер;
2 – барабан; 3 – біфілярна обмотка

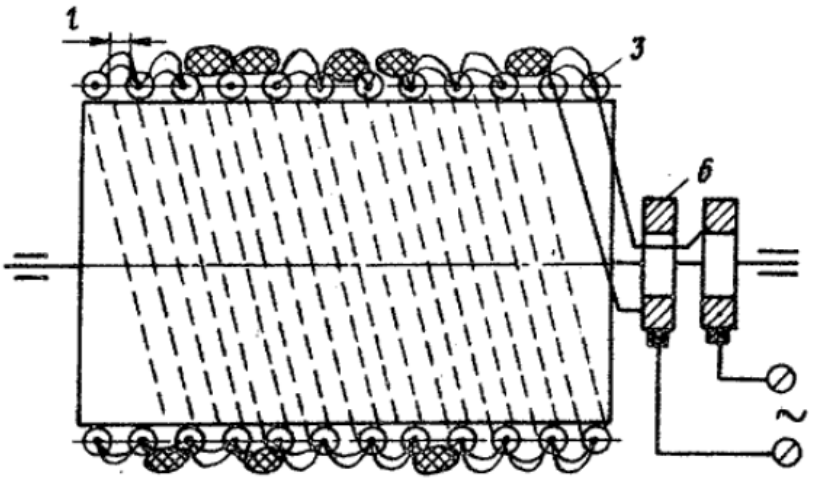


Рисунок 14.3 – Біфілярна обмотка діелектричного барабанного сепаратора:
3 – електроди обмотки; 6 – колектор

Як приклад розглянемо діелектричний барабанний сепаратор (рис. 14.2 і 14.3).

На поверхні барабанного сепаратора покладена біфілярна обмотка, яка намотується з двох ізольованих проводів.

Змінна напруга промислової частоти (50 Гц, до 5 кВ) подається на обидва вхідні кінці обмотки, а два інших кінці залишаються розімкненими. У такій обмотці сусідні проводи перетворюються на два різнойменно заряджені електроди, що ізольовані один від одного. Ці електроди створюють неоднорідне електричне поле, градієнт напруженості якого спрямований до центру барабана, тому на частинку діє сила, спрямована до центру.

Кут відриву насіння від барабана визначається співвідношенням сил $\mathbf{F_п; F_д; F_ц.}$ Чим важчі частинки насіння, тим раніше вони відриваються від барабана.

14.2.3 Розділення за різницею мас частинок

Цей принцип використовує коронний камерний сепаратор.

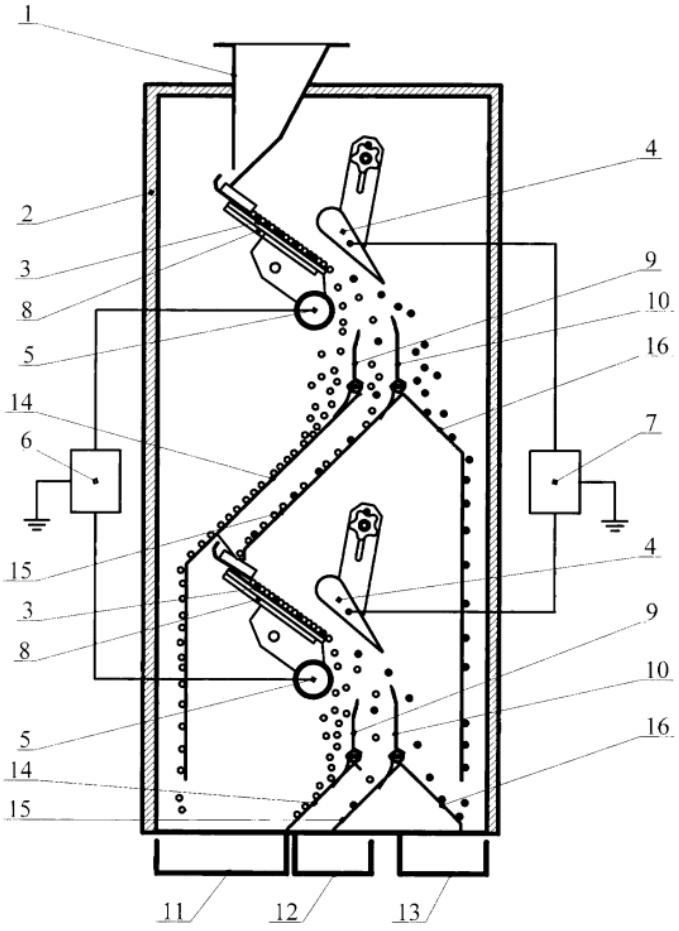


Рисунок 14.4 – Сепаратор коронувальний камерного типу:
1 – приймальний бункер; 2 – корпус; 3 – заземлений електрод; 4, 5 – відповідно верхній і нижній електроди протилежної полярності; 6, 7 – високовольтні джерела живлення; 8 – нагрівач; 9, 10 – розділювачі потоків продукту; 11, 12, 13 – приймачі окремих фракцій продукту після сепарації; 14, 15, 16 – жолоби продуктопровіодів

Частинки різного розміру падають у проміжку між коронувальним і осаджувальним (заземлена металева площина) електродами.

На початковій ділянці руху вони заряджаються і набувають горизонтальної складової швидкості.

У результаті руху у горизонтальному напрямку під дією електричних сил і вертикальному під дією сили тяжіння частинки різної маси мають різну траєкторію. Причому частинки з меншою масою мають горизонтальну складову швидкості більшу, ніж частинки з більшою масою.

14.2.4 Розділення за електричною провідністю

Дія сепараторів цього типу заснована на відмінності поведінки провідних і діелектричних частинок на електроді, що перебувають під високим потенціалом напруги. Частинки з більшою провідністю швидко набувають заряд, аналогічний заряду електрода, відштовхуються від нього і відлітають. Частинки з високим питомим опором важче набувають заряд і далі утримуються електродом.

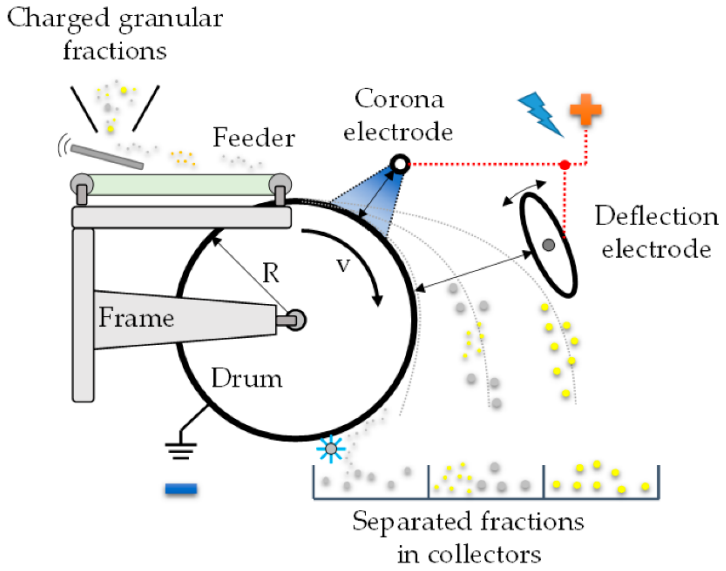


Рисунок 14.5 – Сепаратор коронувальний барабанного типу

Розглянемо принцип дії коронного барабанного сепаратора.

Сипучий матеріал із завантажувального бункера надходить на поверхню заземленого барабана, що обертається, і опиняється у полі коронного розряду, де

відбувається його заряджання. Воно здійснюється за рахунок іонів, полярність яких відповідає полярності коронувального електрода. Заряджання від барабана здійснюється протилежною полярністю. Як правило (особливо для матеріалу з високим питомим опором) матеріал отримує заряд тієї самої полярності, яку має коронувальний електрод.

У верхній частині барабана на частинки діють такі сили:

$F_ц$ – сила відцентрова;

$F_д$ – сила тяжіння, яку можна розкласти на дві складові:

$F_{д1}$ – сила, спрямована до центру барабана;

$F_{д2}$ – сила, спрямована по дотичній до барабана;

$F_з$ – сила дзеркального відображення;

F_q – сила, що діє на заряд в електричному полі.

При цьому механічні сили прагнуть відірвати частинку від барабана, а електричні – притиснути.

Залежно від співвідношення цих сил частинки можуть мати різну траєкторію.

Якщо електричні сили переважають у верхній половині барабана, тоді частинки відриваються і відхиляються максимально (за рис. вправо). Якщо частинка не відривається від барабана в його верхній частині, вона залишається на ньому і виходить із зони дії поля та опиняється у нижній частині барабана. Напруженість поля у цій частині барабана спадає.

У результаті поступово зменшується заряд частинок, впливаючи на їх повернення на барабан. При цьому сили, що притискають частинку до барабана (електричні сили) зменшується, а нормальна складова сили тяжіння збільшується.

Швидкість цього процесу залежить від провідності частинок. Тому частинки з меншою провідністю тримаються на барабані довше, довше відриваються у довшій точці руху барабана. Частинки, які не відокремилися від барабана зчищаються щіткою.

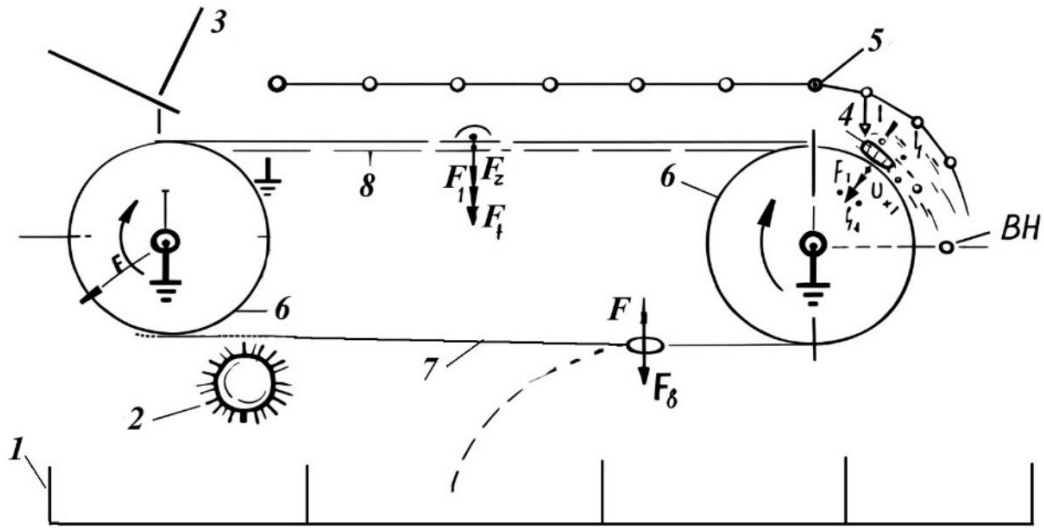


Рисунок 14.6 – Сепаратор коронувальний транспортерного типу:

1 – приймальний бункер; 2 – щітка; 3 – завантажувальний бункер;
4 – продукт, що сепарується; 5 – коронувальний електрод; 6 – барабан;
7 – стрічка транспортера; 8 – заземлений метал

Аналогічний принцип коронного транспортного сепаратора.

Принцип дії сепаратора коронувального типу «Горн» полягає у додатковому впливі електричної сили, що притискає насіння до стрічки, та впливі сили тяжіння.

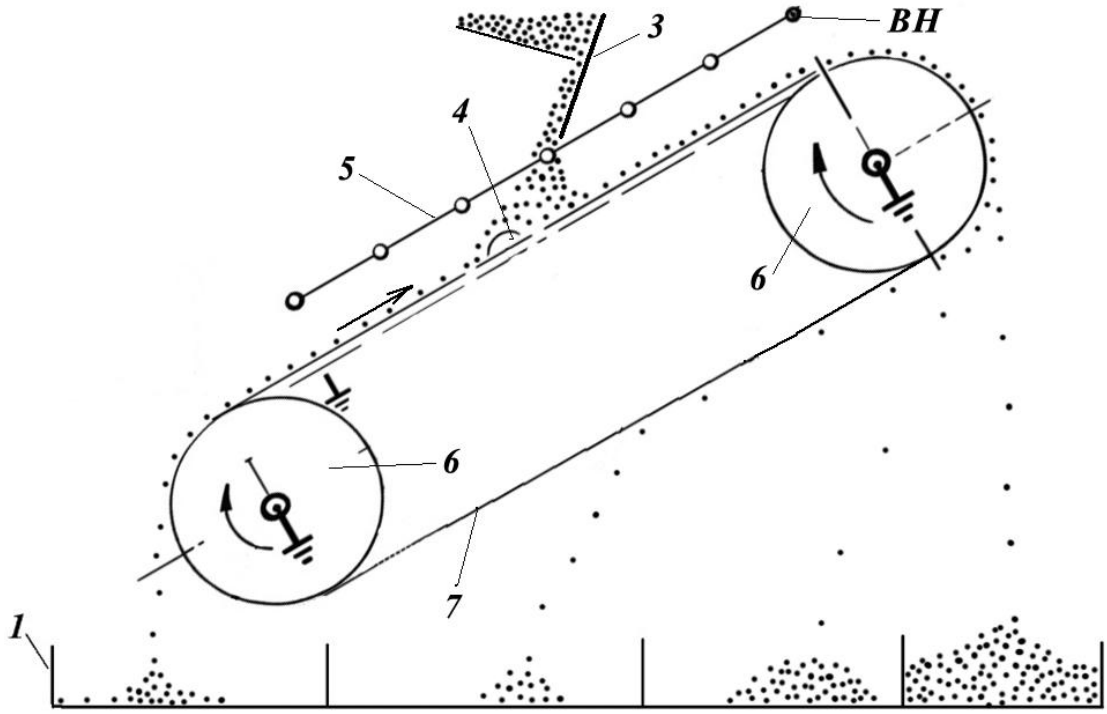


Рисунок 14.7 – Сепаратор коронувального типу «Горн»:

1 – приймальний бункер; 3 – завантажувальний бункер; 5 – коронувальний електрод; 6 – барабан; 7 – стрічка; 8 – заземлений метал

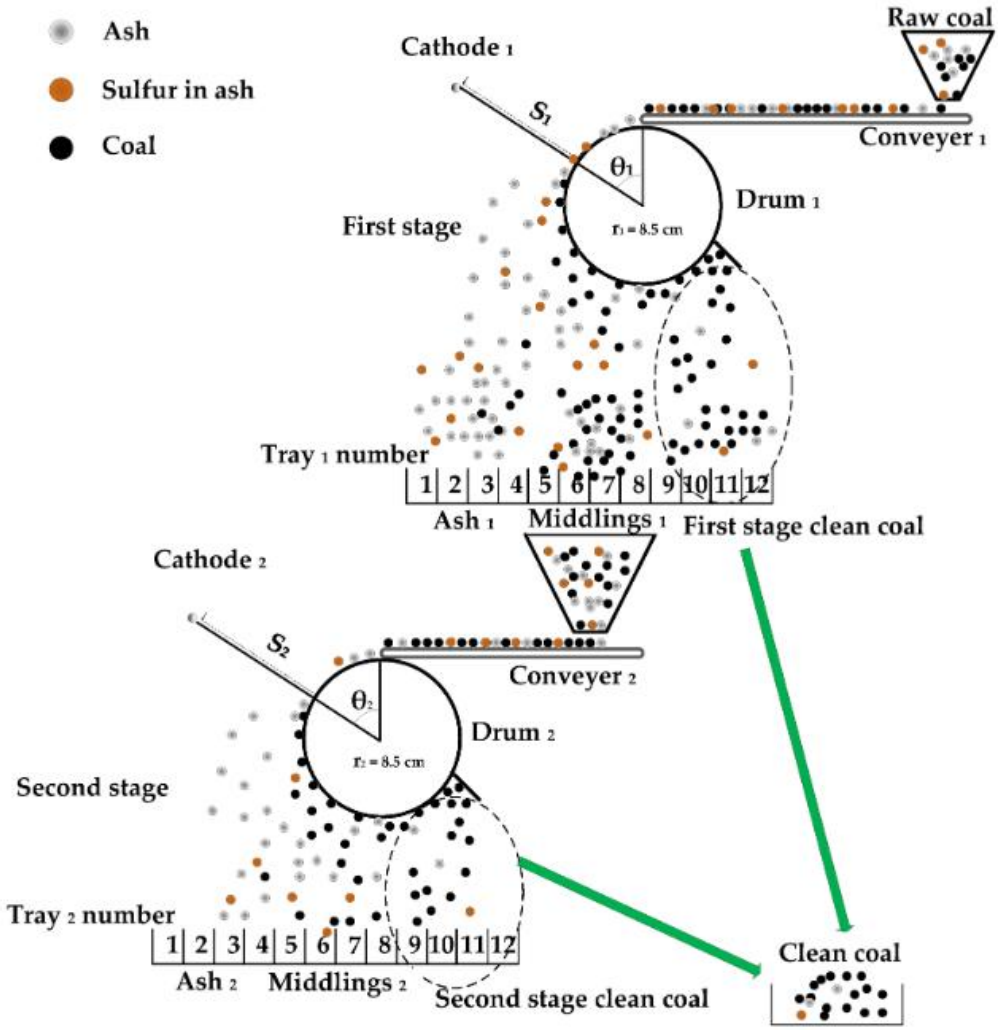


Рисунок 14.8 – Сепаратор коронувальний комбінованого транспортерно-барабанного типу

14.3 Застосування електричних сепараторів у сільському господарстві

Найбільшого поширення як у промисловості, так і у сільському господарстві набув метод сепарації за провідністю.

У сільському господарстві електросепаратори застосовуються для остаточного очищення насіння зернових, овочевих культур, трав; видалення сажкових домішок; знепилювання насіння; сортування насіння шляхом відділення травмованого, пророслого або насіння зі зниженою масою.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 14

1 Які принципи розділення матеріалів реалізуються в електростатичних сепараторах?

2 Чим відрізняються коронувальні, трибоелектричні та діелектричні барабанні сепаратори?

3 Яка роль коронувального електрода та заземленої площини в процесі сепарації?

4 Які матеріальні властивості частинок найбільше впливають на результат?

5 Поясніть роботу установки за рис. 14.1.

6 Для яких задач АПВ найчастіше застосовують електросепарацію?

7 Як швидкість транспортера/барабана впливає на якість розділення?

8 Які вимоги електробезпеки критичні для високовольтних сепараторів?

9 Які фактори знижують стабільність коронного розряду в сепараторах?

10 Які параметри доцільно регулювати для стабільної роботи сепаратора?

Тема 15. МАГНІТНА ОБРОБКА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ ТА МАТЕРІАЛІВ

План

15.1 Отримання магнітних полів

15.2 Магнітне очищення матеріалів

15.3 Магнітна обробка матеріалів

15.4 Магнітна обробка води

15.1 Отримання магнітних полів

У технологічних процесах використовують постійні магнітні та електромагніти з індукцією до 4 Тл.

Постійні магніти виготовляють шляхом попереднього намагнічування магнітотвердих матеріалів, тобто таких матеріалів, які після зняття намагнічувального поля здатні зберігати велику магнітну індукцію.

Постійні магніти порівняно з електромагнітами дешевші та простіші за конструкцією, не потребують джерел живлення, безпечні, однак, у них послаблюється з часом величина поля, не регулюється магнітна індукція, їх складно очищати, вловлювати поверхні та неможливо включити до системи автоматизації.

15.2 Магнітне очищення матеріалів

Для магнітного очищення використовуються відмінність у шорсткостях сипучих матеріалів.

Попередньо сипучі (насіннєвий матеріал) обробляються феромагнітним порошком.

У магнітних апаратах поле створюється системою електромагнітів, що живляться пульсуючим струмом.

Для очищення матеріалів від феромагнітних включень використовують магнітні залізовідділювачі. Їх встановлюють під трансформаторною стрічкою.

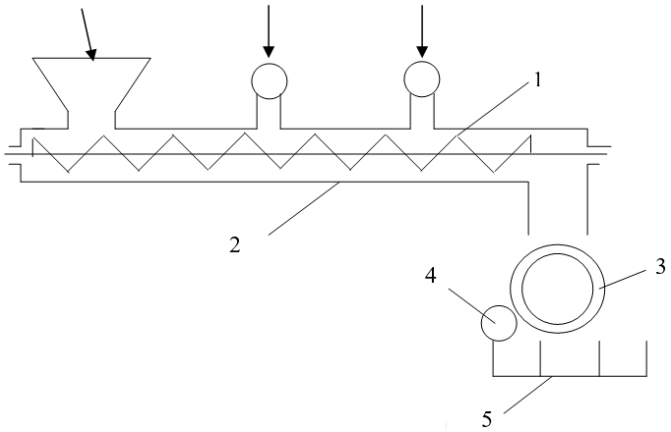


Рисунок 15.1 – Шнековий сепаратор:
1 – шнек; 2 – змішувач; 3 – магнітний барабан;
4 – щітка; 5 – класифікатор

Вилучення матеріалу засноване на силі, що діє на частинку, поміщену в неоднорідне магнітне поле.

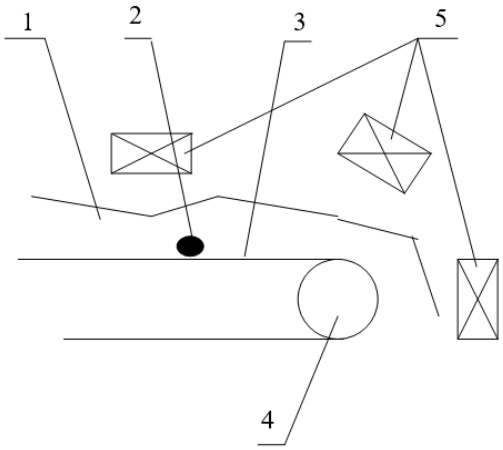


Рисунок 15.2 – Апарат для вилучення феромагнітних включень:
1 – кормова маса; 2 – металева частинка; 3 – стрічка транспортеру;
4 – немагнітний барабан; 5 – магніт (електромагніт)

$$F_м = \mu_0 \cdot \chi_0 \cdot V \cdot H \cdot gradH, \qquad (15.1)$$

де χ_0 – магнітна сприйнятливість частинки;

V – об’єм частинки, м^3;

μ_0 – магнітна стала, Гн/м;

H – напруженість магнітного поля, А/м;

$gradH$ – швидкість зміни напруженості магнітного поля,

$$\chi_0 = \frac{\chi}{1 + N\chi}, \tag{15.2}$$

де χ – магнітна сприйнятливість речовини;

N – фактор розмагнічування (форми)

$$\chi = \mu_2 - 1,$$

де μ_2 – відносна магнітна проникність речовини

$$N = \frac{\gamma \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - \sqrt{\gamma^2 - 1}}{(\sqrt{\gamma^2 - 1})^3}, \tag{15.3}$$

де γ – відносні довжини частинок до діаметра.

15.3 Магнітна обробка матеріалів

У магніто-імпульсній технології використовується сила, що діє на провідник зі струмом, який перебуває в магнітному полі або зовнішньому, або власному

$$F = I \cdot B, \tag{15.4}$$

де I – об’ємна густина струму, А/м^3.

Для ділянок замкненого контуру, що перебувають у власному магнітному полі, напрямок електродинамічних сил, які діють на провідник L у напрямку X можна виразити

$$F = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{dl}{dx}, \tag{15.5}$$

випливає з принципу віртуальної роботи

$$\frac{dW}{dX} = d\left(\frac{Li^2}{2}\right) / dX = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{dL}{dX}. \tag{15.6}$$

Тобто навіть якщо провідник зі струмом був відокремлений, існує сила, яка прагне його стиснути (збільшити індуктивність).

Для досягнення великих динамічних сил (тисків) через провідник потрібно пропустити значний струм і створити велике магнітне поле.

У звичайних електромагнітних пристроях величина магнітного поля не перевищує 2 Тл, а струми до 10–20 А/мм^2, що явно недостатньо для отримання великих механічнихдеформуючих напружень (зусиль).

Оскільки індукція насичення звичайних феромагнітних матеріалів мала (1,5–2 Тл), тоді їхнє застосування для зусилля магнітного поля не приносить результату.

Єдиний вихід – короткочасне пропускання великого струму через провідник (імпульс) за короткочасного пропускання струму в індукторі, що створює імпульсне магнітне поле. При пропущенні струму щільністю порядку $10^{\cdot 10}\frac{A}{м^2}$ звичайні матеріали (Fe, Cu, Al) не плавляться протягом $t \le 10^{-6} c$. У такому ж імпульсному режимі можна отримати індукцію поля без дозволу індуктора В=80 Тл, а з руйнуванням В=200 Тл. Тиск на провідник при цьому становить 1000–1000000 А.

Це явище може використовуватися в різних технологічних процесах (штампування, формоутворення тощо).

Високі густини струму та індукції магнітного поля реалізуються порівняно просто шляхом розряду конденсаторів, що дає змогу отримувати великі електродинамічні зусилля, які перевищують межу міцності більшості конструкційних матеріалів.

Імпульсні електродинамічні сили використовують для прискорення провідників в імпульсному електроприводі та для деформації різних заготовок (магнітне штампування або магніто-імпульсна обробка матеріалів).

Деформація або прискорення провідників здійснюється в імпульсному магнітному полі або під час пропускання через провідник струму від генератора, або під час пропускання по провіднику струму, індукованого поруч розташованого індуктором. В останньому випадку сумарні електродинамічні сили, що діють на провідник, виражаються через тиск магнітного поля

$$p = \frac{b_1^2 - b_2^2}{2\mu_0}, \qquad (15.7)$$

де b_1 – індукція магнітного поля біля поверхні оброблюваної деталі з боку індуктора, Тл;

b_2 – індукція магнітного поля за заготовкою, Тл;

μ_0 – магнітна стала, Гн/м ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Максимальний тиск буде в разі, якщо поле не пройшло за заготовку ($b_2 = 0$), тому на величину тисків впливає:

1) частота поля, f;

2) опір матеріалу, Ом;

3) близькість індуктора до заготовки;

4) магнітні властивості заготовки;

5) поверхневий ефект.

Можливе створення ефекту притягання неферомагнітних речовин, якщо між заготівлею та індуктором створити протилежно спрямоване постійне магнітне поле, а поле індуктора має проходити через заготівлю, тоді b_2 буде відмінним від 0, а b_1 буде таким, що дорівнює 0, тобто P < 0.

Під час магніто-імпульсної обробки досягаються швидкості переміщення заготовки до декількох сотень метрів на секунду.

1 Відмінною особливістю магніто-імпульсної обробки є відсутність інерційного струменя, через який як правило передають тиск на оброблювану деталь; розподіл електродинамічних сил за об’ємом заготовки, можливість здійснювати операції у будь-якому газовому середовищі або вакуумі через ізоляційні вставки.

2. До переваг магнітного штампування належать також можливість точного регулювання електродинамічних сил шляхом зміни електричних параметрів установки, приросту оснащення, можливість повної автоматизації.

У цій установці (рис. 15.3) оброблювану заготовку включають послідовно в ланцюг розряду, що складається з конденсатора С і розрядника Р. Електродинамічні сили створюють завдяки взаємодії струму в заготівлі з магнітним полем, створеним струмом у зворотному дроті, який прикладено в

безпосередній близькості від заготовки. Заготовка при цьому рухається в напрямку стрілок. За заготівлею розташовують матрицю.

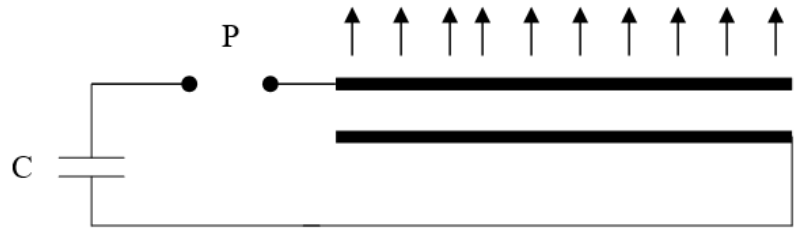


Рисунок 15.3 – Розрядний ланцюг установки 1

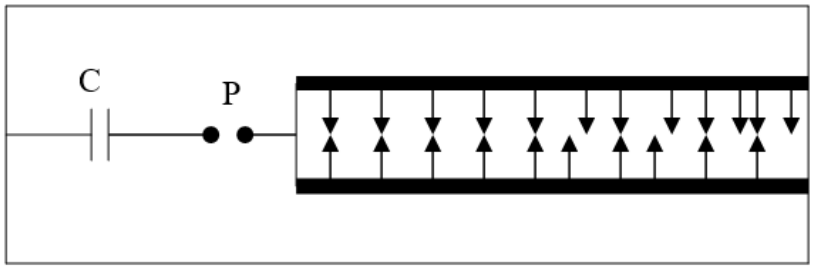


Рисунок 15.4 – Розрядний ланцюг установки 2

У цій установці (рис. 15.4) струм проходить по заготовках в одному напрямку, а зворотний струмопровід виконаний у вигляді трубки для зменшення індуктивності. У таких установках здійснюється обтиск заготовок, пресування, формоутворення.

Недолік – труднощі створення великих струмів і підключення струмоведучих жил до заготовки.

Такого недоліку позбавлений наступний спосіб, а саме установки з індуктором (рис. 15.5). У цьому випадку багатовитковий індуктор разом із заготовкою утворює понижувальний трансформатор, і сумарний струм, що протікає по заготівлі, може у багато разів перевищувати струм первинної обмотки.

Для обробки заготовок з малими розмірами використовують концентрати К магнітного потоку, що являють собою масивні деталі з матеріалу, що добре проводить, з великою механічною міцністю. Концентратор має вузьку аксіальну щілину і являє собою незамкнутий виток.

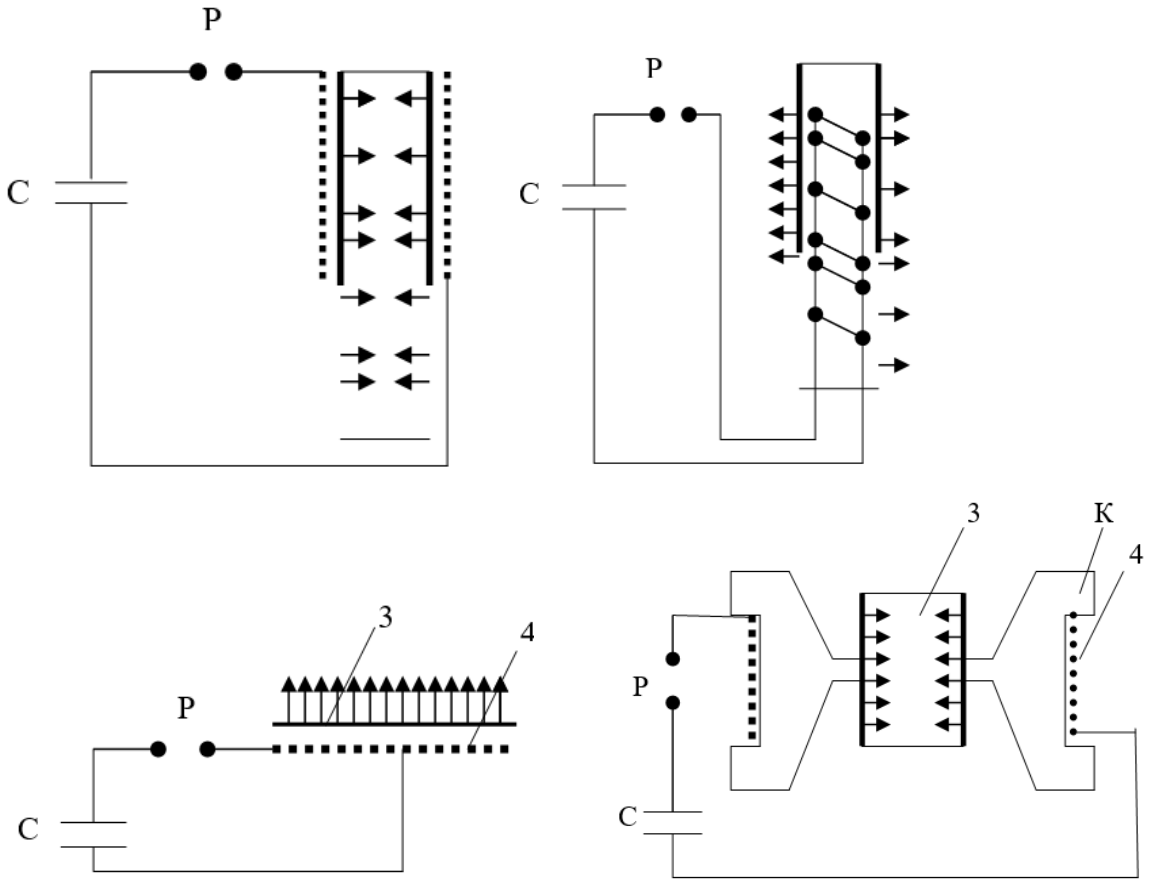


Рисунок 15.5 – Установки з індуктором

Для розрахунку перехідних процесів використовують електричні схеми заміщення розрядних контурів.

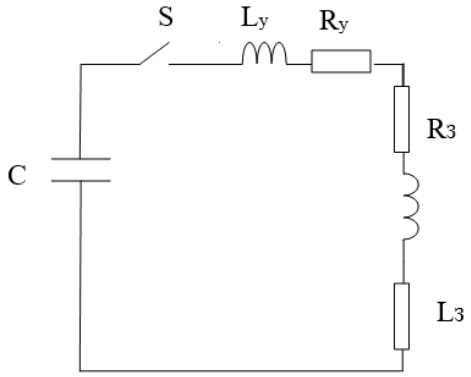


Рисунок 15.6 – Електрична схема заміщення розрядних контурів для установок типу 1,2:
R_y – опір установки; L_y – індуктивність установки;
$R_з$ – опір заготовок; $L_з$ – індуктивність заготовок

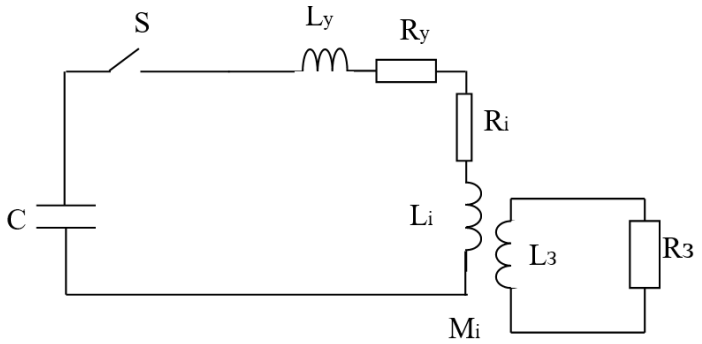


Рисунок 15.7 – Електрична схема заміщення розрядних контурів для установок концентратором:
R_i – опір індуктора; L_i – індуктивність індуктора;
M_i – взаємна індуктивність індуктора заготовки

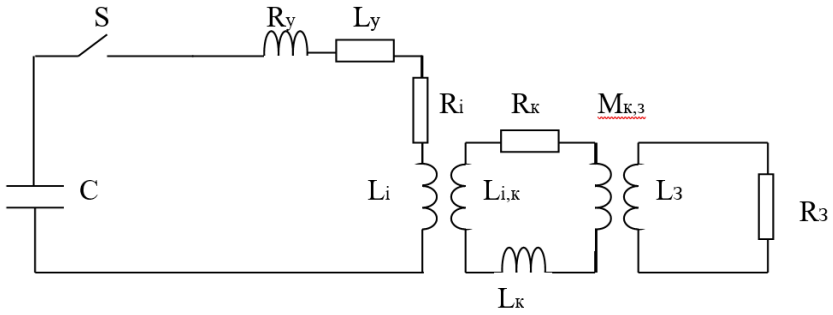


Рисунок 15.7 – Електрична схема заміщення розрядних контурів для установок типу 3, 4:

$R_к$ – опір концентратора;

$L_к$ – індуктивність концентратора;

$L_{i,к}$ – індуктивність ділянок концентратора, що межують з обмоткою індуктора;

$L_{з,к}$ – індуктивність ділянок концентратора, що межують з обмоткою заготовки;

$M_{i,к}, M_{к,з}$ – взаємна індуктивність «індуктор – концентратор», «концентратор – заготовка».

Як приклад наведено дані установок для магніто-імпульсного оброблення металу.

15.4 Магнітна обробка води

Магнітну обробку застосовують для зниження накипоутворення на стінках теплообмінних апаратів. Солі, що містяться у воді, Ca, Mg, та ін. при подальшому нагріванні меншою мірою осідають на стінках теплообмінників.

Механізм магнітної обробки пояснюється порушенням водневих зв'язків у молекулі води і гідратацію іонів.

Для магнітного оброблення води застосовують різні апарати.

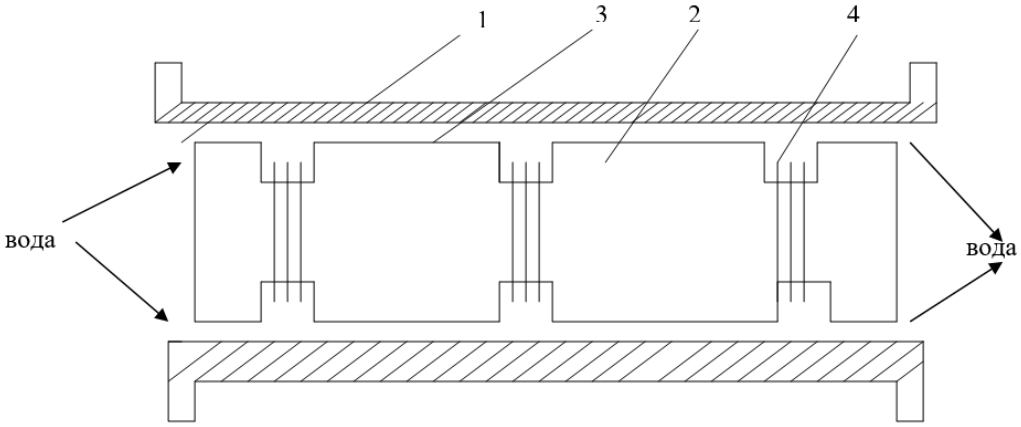


Рисунок 15.8 – Апарат для магнітного оброблення води:

1 – сталевий корпус; 2 – стрижень електромагніту;
3 – латунна гільза; 4 – обмотка електромагніту

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 15

1 Які види магнітних полів/джерел магнітного поля застосовують у технологічних установках?

2 Для яких цілей у АПВ використовують магнітну обробку?

3 Чим відрізняється магнітна сепарація від електростатичної сепарації за принципом дії?

4 Які фактори визначають ефективність магнітного очищення матеріалів від металевих домішок?

5 Поясніть принципову схему установки за рис. 15.1.

6 Які параметри магнітного поля (індукція, градієнт) є ключовими для технологічного ефекту?

7 Які обмеження і спірні моменти існують щодо магнітної обробки води або розчинів?

8 Які показники якості продукції/середовища доцільно контролювати після магнітної обробки?

9 Що ілюструє рис. 15.8 і як його пов’язати з принципом дії установки?

10 Які вимоги безпеки та технічного обслуговування характерні для магнітних установок?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Бацуровська, І. В. (2021). Електротехнології. МНАУ, 258 с.

2. Шебанін, В. С., Бацуровська, І. В., Гавриш, В. І., & Грубань, В. А. (2022). Електротехнології в АПК. МНАУ, 326 с.

3. Кушлик, Р. В., Назаренко, І. П., & Кушлик, Р. Р. (2021). Практикум з навчальної дисципліни «Електротехнології і теплові процеси». ФОП Ландар С. М., 113 с.

4. Мельничук, В. В., Муляр, О. Д., Тимків, В. В., & Войцицький, А. П. (2024). Електротехнологія. ПП «Рута», 152 с.

5. Бржезицький, В. О., Козюра, В. В., & Козюра, В. М. (2016). Застосування електричних і магнітних полів у промисловому та сільськогосподарському виробництві. Ч. 2: Технології, засновані на силовій дії електричних і магнітних полів. ФЕА НТУУ «КПІ», 119 с.

6. Матвійчук, В. А., Рубаненко, О. Є., & Стаднійчук, І. П. (2020). Електротехнології в АПК. ТОВ «ТВОРИ», 272 с.

7. Електротехнологічні установки та системи. (2020). КПІ ім. Ігоря Сікорського, 136 с.

8. Chavan, R. S., Manohar, M. P., & (співавт.). (2022). Ultrasound-assisted food processing: A review. Foods, 11(1), 122. doi:10.3390/foods11010122.

9. Li, Y., (співавт.). (2024). Recent advances in innovative infrared drying techniques applied to fruits and vegetables: A review. Agriculture, 14(2), 214. doi:10.3390/agriculture14020214.

10. Salehi, F. (2021). Recent advances in the infrared drying of food products: A review (на прикладі плодово-овочевої сировини). Drying Technology. doi:10.1080/15538362.2021.1908202.

11. Xu, J., & Wang, S. (2019). Radio frequency drying of food products: A review. Drying Technology, 37(3), 271–286. doi:10.1080/07373937.2018.1452255.

12. Magnisali, P., (співавт.). (2022). Electrocoagulation for water and wastewater treatment: A review. Journal of Chemical Technology & Biotechnology. doi:10.1002/jctb.6880.

13. Biswas, A., (співавт.). (2022). Electrocoagulation/electrooxidation for wastewater treatment: A review. Chemosphere, 136808. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.136808.

14. Zhu, Z., (співавт.). (2021). Electrostatic separation applications in food/bioproduct processing (напр., рослинні білки). Trends in Food Science & Technology. doi:10.1016/j.tifs.2021.05.031.

15. Reguig, A., (співавт.). (2017). A belt-type electrostatic separator for fine particles: Design and separation performance. Journal of Electrostatics. doi:10.1016/j.elstat.2017.06.008.

16. Singh, R., (Ed.). (2024). Microwave Processing of Foods: Challenges, Advances and Engineering Solutions. Springer.

Козін Віктор Миколайович,
Савойський Олександр Юрійович,
Сіренко Юлія Володимирівна

Електротехнології в АПВ

Конспект лекцій

для здобувачів спеціальності 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. 6,5