

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В АПВ

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

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 :

Методичні вказівки щодо виконання самостійної роботи 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 – 112 с.

У методичних вказівках зібраний допоміжний теоретичний матеріал з електротехнологічних процесів, що застосовуються у агропромисловому виробництві, що не увійшов до конспекту лекцій. Методичні вказівки будуть корисними під час вивчення дисципліни «Електротехнології в АПВ», підготовки до проходження практик, написання кваліфікаційних робіт, а також при вирішенні практичних завдань, пов'язаних з сучасними технологіями агропромислового виробництва.

Рецензенти:

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

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

Відповідальний за випуск:

Юрченко О. Ю., PhD, 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

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	4
Тема 1. Електротермічні установки в тваринництві.	
Установки для підігріву води.....	6
Тема 2. Електротермічні установки в тваринництві.	
Установки для обігріву приміщень.....	18
Тема 3. Електротермічні установки в рослинництві.	
Установки для обігріву ґрунту.....	24
Тема 4. Електротермічні установки в рослинництві.	
Установки для технологічної обробки та зберігання продукції.....	29
Тема 5. Електротермічні установки на ремонтних підприємствах.	
Електричні печі.....	35
Тема 6. Електротермічні установки на ремонтних підприємствах.	
Електрозварювальне обладнання.....	41
Тема 7. Установки електрофізичної обробки.....	49
Тема 8. Електроіскрові та електроімпульсні установки.....	61
Тема 9. Електрогідравлічні установки.....	69
Тема 10. Ультразвукові установки.....	73
Тема 11. Установки електрохімічної обробки.....	81
Тема 12. Установки електрохімічної обробки. Електрографія.....	88
Тема 13. Установки електронно-іонної технології.....	94
Тема 14. Установки електронно-іонної технології.	
Установки сепарації матеріалів.....	98
Тема 15. Магнітна обробка сільськогосподарської продукції та матеріалів.....	103
Список літератури.....	108

ВСТУП

Методичні вказівки щодо самостійної роботи здобувачів з дисципліни «Електротехнології в АПВ» спрямовані на формування системного науково-інженерного мислення, здатності до самостійного аналізу електротехнологічних процесів, а також на розвиток навичок проєктування та оптимізації сучасних електротермічних і електрофізичних установок. Поданий у матеріалах зміст охоплює широкий спектр технологій – від класичних електротермічних процесів нагріву до сучасних електрофізичних, електрохімічних та електронно-іонних методів обробки, що активно впроваджуються у світовій практиці аграрного виробництва

Актуальність даних методичних матеріалів обумовлена переходом аграрного сектору до енергоефективних та електрифікованих технологій, які забезпечують підвищення продуктивності, зниження витрат ресурсів і мінімізацію негативного впливу на довкілля. У сучасних умовах електрична енергія розглядається не лише як універсальний енергоносіє, а як високочергований інструмент впливу на фізичні, хімічні та біологічні процеси, що дозволяє досягати принципово нових результатів у технологіях обробки продукції та утримання тварин.

Самостійна робота здобувачів у межах цієї дисципліни має не лише репродуктивний, а насамперед аналітико-дослідницький характер. Вона передбачає глибоке опрацювання фізичних основ процесів, критичний аналіз різних технічних рішень, а також здатність порівнювати альтернативні технології за техніко-економічними показниками. Особливе значення приділяється розумінню міждисциплінарних зв'язків між електротехнікою, теплотехнікою, матеріалознавством, біофізикою та аграрними технологіями.

Важливою особливістю сучасного розвитку електротехнологій є їх інтеграція з цифровими системами керування, автоматизацією та концепціями інтелектуального виробництва. У цьому контексті самостійна робота здобувачів повинна включати аналіз можливостей застосування систем автоматизованого керування (SCADA, PLC), методів оптимізації енергоспоживання, а також

принципів гнучкого керування навантаженням. Це дозволяє розглядати електротермічні установки не як ізольовані об'єкти, а як складові комплексних енерготехнологічних систем.

Суттєвим аспектом є також орієнтація на сучасні світові тенденції розвитку галузі. До них належать електрифікація теплових процесів, використання відновлюваних джерел енергії, впровадження теплових насосів, систем акумулювання енергії, а також розвиток нетеплових методів обробки продукції, таких як імпульсні електричні поля, холодна плазма та ультразвук. Усі ці напрями мають високий потенціал для застосування в агропромисловому комплексі та активно досліджуються у провідних наукових центрах Європи та США.

У процесі самостійної роботи здобувач повинен не лише засвоїти теоретичний матеріал, а й навчитися застосовувати його для вирішення практичних завдань у межах практичних робіт. Це передбачає виконання розрахунків, аналіз технічної документації, вивчення сучасних наукових публікацій, а також формування власних висновків щодо ефективності тих чи інших технологічних рішень.

Отже, дані методичні вказівки є інструментом формування професійної компетентності майбутнього інженера-електрика, здатного працювати в умовах сучасного високотехнологічного агропромислового виробництва. Вони сприяють розвитку аналітичного мислення, інженерної культури та здатності до впровадження інноваційних технологій, що є ключовими вимогами до фахівців у галузі електричної інженерії.

Тема 1. ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ В ТВАРИННИЦТВІ.

УСТАНОВКИ ДЛЯ ПІДГРІВУ ВОДИ

1.1 Установки для підігрівання води

Електротермічні установки для підігрівання води в тваринництві є складовою систем енергозабезпечення технологічних процесів на фермах і комплексах різного профілю – молочних, свинарських, птахівничих та комбінованих агропідприємствах. Підігріта вода використовується для напування тварин, санітарно-гігієнічних операцій, миття обладнання, приготування кормових сумішей, а також для підтримання оптимальних мікрокліматичних параметрів у приміщеннях. У зв'язку з високими вимогами щодо якості води та енергоефективності технологій особливого значення набувають електричні системи нагрівання, які забезпечують точне регулювання температури, автоматизацію процесів і екологічну безпечність експлуатації.

Електричні установки для підігрівання води функціонують на основі перетворення електричної енергії у теплову шляхом прямого або опосередкованого електротермічного впливу. Найпоширенішим є резистивний нагрів, що базується на законі Джоуля-Ленца, згідно з яким теплота, що виділяється у провіднику, пропорційна квадрату сили струму, опору та часу проходження струму. У водонагрівальних установках це реалізується за допомогою трубчастих електронагрівачів (ТЕН), електродних нагрівачів або індукційних систем, де тепловиділення відбувається безпосередньо у робочому середовищі або у проміжному теплообмінному контурі.

За конструктивним виконанням установки для підігрівання води поділяються на проточні та ємнісні (накопичувальні, об'ємні, акумулюючі). Проточні електроводонагрівачі забезпечують нагрівання води безпосередньо під час її проходження через нагрівальний блок, що дозволяє отримувати гарячу воду практично миттєво. Такі системи характеризуються високою питомою потужністю, компактністю та можливістю інтеграції в автоматизовані технологічні лінії. Водночас вони потребують стабільних параметрів електроживлення і точного регулювання витрати води, оскільки перевищення

допустимої витрати води може призвести до зниження температури на виході та погіршення санітарно-технологічних показників, а зменшення – до створення умов для закипання води та подальшого виходу електрокалорифера з ладу внаслідок розриву водяного контура від стрибкоподібного збільшення тиску при утворенні пароводяної суміші. Крім того, перегрівання води може призвести до отримання опіків обслуговуючим персоналом.

Ємнісні водонагрівальні установки працюють за принципом акумулювання теплової енергії у теплоізовьованому резервуарі. Нагрівання води здійснюється періодично, а подача – за потребою технологічного процесу. Перевагою таких установок є можливість вирівнювання графіків електроспоживання, використання нічних тарифів та забезпечення стабільного температурного режиму води. Недоліком є більші габаритні розміри, необхідність якісної теплоізоляції та збільшення часу початкового нагрівання.

У сучасних агропромислових системах широко застосовуються комбіновані електротермічні установки, що поєднують електричне нагрівання із використанням теплових насосів, сонячних колекторів або рекупераційних систем утилізації теплоти від вентиляційного повітря або молочних охолоджувачів. Такий підхід дозволяє істотно знизити питомі витрати електроенергії на підігрів води та підвищити загальну енергоефективність тваринницьких підприємств. У країнах ЄС активно впроваджуються гібридні системи перетворення електричної енергії на теплову, які поєднують електричні нагрівачі з інтелектуальними системами керування навантаженням, що адаптуються до коливань відновлюваної генерації.

З погляду теплотехнічного аналізу процес підігрівання води в електротермічних установках описується рівнянням теплового балансу, яке враховує кількість теплоти, необхідної для підвищення температури води, теплові втрати через стінки резервуарів, трубопроводів і теплообмінників, а також ККД установки, про що більш докладно йде мова у конспекті лекцій. Теплові втрати суттєво залежать від якості теплоізоляції, температури довкілля та тривалості циклу нагрівання. Для тваринницьких ферм, розташованих у

регіонах із холодним кліматом, оптимізація теплоізоляції водонагрівальних баків має ключове значення, оскільки дозволяє зменшити втрати теплоти на 20–30 %.

Електродні водонагрівачі, які працюють за принципом пропускання електричного струму безпосередньо через воду, використовуються в умовах, де необхідне швидке нагрівання великих об'ємів рідини. Їх ефективність значно залежить від електропровідності води, що визначається мінералізацією та температурою. Такі установки мають просту конструкцію, проте вимагають ретельного контролю параметрів електробезпеки та системи заземлення, оскільки вода виступає струмопровідним середовищем.

Індукційні електроводонагрівачі є перспективним напрямом розвитку електротермічних технологій у тваринництві. У них нагрівання здійснюється внаслідок виникнення вихрових струмів у металевому теплообміннику, розміщеному у змінному магнітному полі. Перевагою індукційного нагрівання є відсутність прямого контакту нагрівального елемента з водою, що зменшує утворення накипу, підвищує довговічність обладнання та забезпечує стабільні теплотехнічні характеристики. У США та країнах ЄС такі системи застосовуються в енергоефективних фермерських господарствах із високим рівнем автоматизації.

Автоматизація установок для підігрівання води базується на використанні датчиків температури, витрати та тиску, а також програмованих логічних контролерів, що реалізують алгоритми керування нагрівом залежно від технологічних потреб ферми. Застосування цифрових систем моніторингу дозволяє оптимізувати режими роботи водонагрівачів, зменшити пікові навантаження на електромережу та забезпечити дистанційний контроль параметрів через SCADA-системи. Це особливо актуально для великих агропромислових комплексів, де централізоване керування енергоспоживанням сприяє підвищенню економічної ефективності виробництва.

Важливим аспектом експлуатації електротермічних установок є забезпечення надійності та електробезпеки. В умовах підвищеної вологості тваринницьких приміщень необхідно застосовувати захисні пристрої від струмів витоку (ПЗВ або інколи – УЗО), системи вирівнювання потенціалів та

автоматичні вимикачі диференційного струму. Конструкції нагрівачів повинні відповідати вимогам ступеня захисту не нижче IP54, що забезпечує безпечну роботу обладнання в агресивному середовищі.

З енергетичної точки зору ефективність установок для підігрівання води визначається ККД, питомими витратами електроенергії та можливістю використання відновлюваних джерел енергії.

У тваринництві підігрів води технічно є не лише операцією забезпечення комфорту (напування, санітарні процеси), але й частиною енергосистеми господарства: водонагрівальні контури часто інтегруються з вентиляцією, утилізацією теплоти та керуванням піковими навантаженнями. Найбільше поширення мають електродні та елементні (трубчасті електронагрівачі, ТЕН – трубчастий електронагрівач) водонагрівачі, зокрема через $\cos\varphi \approx 1$ і конструктивну простоту, а також з урахуванням сучасних реалій експлуатації до цього додається ще одна причина: ці установки легко поєднувати з цифровими регуляторами потужності та системами керування навантаженням.

Сучасні різновиди та інженерні тренди. У ЄС і США дедалі частіше в проєктах ферм розглядають зв'язку «електрокотел або електронагрівач + теплова акумуляція», що отримало аббревіатурну назву TES – Thermal Energy Storage, або теплова акумуляція як технологію гнучкості для електромережі: нагрів виконують у години генерації дешевшої електроенергії або низьковуглецевої генерації (СЕС, ВЕС, геотермальні ТЕС тощо), а отримане тепло використовують пізніше. Це особливо релевантно там, де є фотоелектричні системи або тарифні зони. Такий підхід широко описується як інструмент DR або керування попитом для теплових споживачів, включно з водонагрівачами та тепловими насосами.

Паралельно розвивається напрям високотемпературних теплових насосів для виробництва гарячої води. У сучасних промислових господарствах молокопереробної промисловості і суміжних агротехнологічних процесах здійснюють поступову заміну парових або газових систем на електрокотли або теплові насоси, під'єднані безпосередньо до контуру гарячої води ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$) з тепловою акумуляцією. Це дозволяє не просто підігріти воду або молоко, а

електрифікувати теплопостачання зі зменшенням викидів та підвищенням керованості і енергоефективності енергоспоживання.

👉 Сучасні дослідження спрямовані на інтеграцію електротермічних систем із фотоелектричними модулями та акумуляторами теплової енергії, що дозволяє створювати автономні або частково автономні системи гарячого водопостачання для фермерських господарств.

👉 **Цікаві факти.** У багатьох енергосистемах саме водонагрівачі та теплові акумулятори розглядають як один із найпростіших ресурсів гнучкості, бо вони можуть перерозподіляти електричне навантаження у часі, не знижуючи якості технологічного процесу.

Для агропідприємств з холодильними установками актуальною є ідея отримання теплоти від роботи холодильних установок у теплофікаційних установках (термотрансформаторах), де теплота, що відводиться холодильниками або чилерами, може бути корисним джерелом для водопідігріву або сушіння, і у 2025 р. є приклади оцінки доцільності такої інтеграції на молочних фермах.

Отже, установки для підігрівання води у тваринництві є складними електротехнічними системами, які поєднують процеси електричного нагріву, теплопередачі, автоматизованого керування та енергозбереження. Їхній розвиток пов'язаний із впровадженням інтелектуальних систем керування, індукційних та гібридних методів нагріву, що забезпечують підвищення енергоефективності, надійності та екологічної безпечності технологічних процесів у сучасному аграрному виробництві.

1.2 Обґрунтування та вибір способу нагріву

Обґрунтування та вибір способу нагріву води в електротермічних установках тваринницьких підприємств є комплексним техніко-економічним завданням, що враховує технологічні вимоги виробництва, енергетичні характеристики джерела живлення, санітарно-гігієнічні умови експлуатації та перспективи інтеграції енергоефективних технологій. Основною метою вибору

способу нагріву є забезпечення заданого температурного режиму води з мінімальними витратами електричної енергії, високою надійністю та відповідністю вимогам біобезпеки.

Вибір способу електричного нагріву ґрунтується на аналізі теплового навантаження, яке визначається добовою потребою у гарячій воді для технологічних процесів: напування тварин, миття доїльного обладнання, санітарної обробки приміщень, приготування кормових сумішей. Розрахунок теплового навантаження включає визначення масової витрати води, різниці температур між початковим та кінцевим станом, а також урахування коефіцієнтів нерівномірності водоспоживання протягом доби. Як правило для молочнотоварних ферм температурний діапазон нагріву води становить 40–70 °С, тоді як для санітарної обробки може досягати 85–90 °С.

Одним із ключових критеріїв вибору способу нагріву є енергоефективність. Резистивний нагрів за допомогою трубчастих електронагрівачів характеризується високим ККД, що наближається до 0,95–0,98, та простотою конструкції. Проте він супроводжується утворенням накипу на поверхні нагрівальних елементів, що призводить до зниження тепловіддачі, підвищення температури спіралі та скорочення терміну служби обладнання. У зв'язку з цим у сучасних системах застосовуються ТЕНи з антикорозійними покриттями та автоматичними системами контролю перегріву.

Електродний спосіб нагріву доцільно використовувати при значних об'ємах води та необхідності швидкого теплового впливу. Його перевагою є висока питома потужність та рівномірний розподіл тепловиділення в об'ємі рідини. Разом з тим ефективність електродних нагрівачів істотно залежить від електропровідності води, яка змінюється залежно від мінералізації, температури та хімічного складу. Це потребує додаткового контролю якості води та застосування систем автоматичного регулювання напруги для стабілізації теплового режиму.

Індукційний спосіб нагріву води в останні роки набуває поширення в енергоефективних аграрних комплексах ЄС та США. Він базується на перетворенні електричної енергії у теплову через вихрові струми, що

індукуються в металевому теплообміннику змінним магнітним полем. Перевагами індукційного нагріву є відсутність прямого контакту нагрівального елемента з водою, зменшення утворення накипу, підвищена довговічність та можливість точного регулювання потужності за допомогою частотних перетворювачів. Такий спосіб є особливо ефективним у системах із високими вимогами до гігієнічної чистоти та стабільності температури.

Вибір способу нагріву також пов'язаний із режимом роботи водонагрівальної установки. Для безперервних технологічних процесів доцільним є використання проточних електронагрівачів, які забезпечують миттєвий нагрів води без необхідності накопичення великих об'ємів. Для періодичних процесів, навпаки, більш ефективними є ємнісні системи, що дозволяють акумулювати теплову енергію та використовувати її в моменти пікового водоспоживання.

Для багатьох об'єктів енергоефективність визначається не паспортним ККД, а тим, чи вдається перенести нагрів на години з більш дешевою вартістю генерації та з використанням низьковуглецевих джерел без втрати технологічної якості.

У сучасних підходах до електрифікації тепlopостачання, наприклад, у молочній галузі прямо фігурує сценарій модернізації, що полягає відмови від парового тепlopостачання і перехід на використання електродкотла або високотемпературного теплового насосу з підключенням системи теплової акумуляції, тобто відхід від генерації пари на користь використання керованого контуру гарячої води.

Отже, обґрунтування та вибір способу нагріву води в тваринництві повинні базуватися на комплексному аналізі теплотехнічних, електротехнічних, економічних та санітарних факторів. Рациональний вибір технології нагріву забезпечує підвищення енергоефективності, надійності та довговічності електротермічних установок, що є важливим чинником модернізації сучасних аграрних підприємств.

1.3 Розрахунок конструктивних параметрів установок

Розрахунок конструктивних параметрів електротермічних установок для підігріву води передбачає визначення геометричних, теплотехнічних та електричних характеристик обладнання, які забезпечують задані технологічні режими роботи з урахуванням експлуатаційних умов тваринницьких підприємств. Основними параметрами, що підлягають визначенню, є об'єм водонагрівального резервуара, потужність нагрівальних елементів, площа теплообміну, товщина теплоізоляції, а також параметри електроживлення та системи керування.

Початковим етапом розрахунку є визначення необхідної теплової потужності установки, яка залежить від масової витрати води, її теплоємності та різниці температур між вхідною та вихідною водою. Цей параметр визначає загальну електричну потужність нагрівальних елементів і впливає на вибір типу електронагрівачів, перерізів струмопровідних провідників та апаратів захисту. Для великих тваринницьких комплексів потужність водонагрівальних установок може досягати десятків і сотень кіловат.

Наступним етапом є визначення конструктивного об'єму резервуара для ємнісних установок. Об'єм залежить від добової потреби у гарячій воді та коефіцієнта нерівномірності споживання. При цьому враховують можливість акумулювання теплової енергії в нічні години з метою вирівнювання графіка електричного навантаження. Розрахунок об'єму резервуара здійснюється з урахуванням допустимого часу нагріву та необхідного температурного запасу.

Важливим конструктивним параметром є площа теплообміну, яка визначає інтенсивність передачі теплоти від нагрівального елемента до води. Для ТЕНових нагрівачів вона залежить від довжини та діаметра трубчастих елементів, їхнього розташування в резервуарі та умов природної або примусової конвекції. У сучасних установках використовуються турбулізатори потоку, що підвищують коефіцієнт тепловіддачі та забезпечують рівномірний розподіл температури по об'єму води.

Теплоізоляція є важливим елементом конструкції, оскільки теплові втрати через стінки резервуара можуть становити до 15–20 % від загальної теплової

потужності установки. Товщина теплоізоляційного шару визначається на основі теплотехнічного розрахунку, що враховує коефіцієнт теплопровідності матеріалу, температуру навколишнього середовища та допустимий рівень тепловтрат. Найчастіше застосовуються пінополіуретанові або мінераловатні ізоляційні матеріали з низькою теплопровідністю.

Електричні параметри установки включають вибір напруги живлення, схеми підключення нагрівальних елементів та параметрів системи автоматичного регулювання. При великих потужностях доцільно використовувати трифазні системи живлення, що дозволяє зменшити струмові навантаження на окремі фази та підвищити стабільність роботи установки. Система керування зазвичай включає терморегулятори, контактори, пристрої плавного пуску та захисту від перевантаження і короткого замикання.

У сучасних енергоефективних установках розрахунок конструктивних параметрів доповнюється моделюванням теплових процесів за допомогою програмних засобів комп'ютерної гідродинаміки (*англ.* CFD). Це дозволяє оптимізувати розміщення нагрівальних елементів, зменшити теплові втрати та підвищити рівномірність температурного поля в резервуарі. Такий підхід широко застосовується в інженерній практиці провідних виробників електротермічного обладнання в Європі та Північній Америці.

Сучасне трактування порядку розрахунків теплообмінних установок доцільно доповнювати трьома додатковими видами, які в інженерії впродовж останнього десятиліття стали стандартом:

1) Ексергетична оцінка на основі ексергетичний аналізу установки або електротехнічної системи в цілому. Вона показує не лише кількість втраченої енергії у вигляді тепла або електроенергії, але й її якість та шляхи виникнення найбільших незворотних втрат. Це особливо важливо при порівнянні прямого електронагріву і теплового насоса: енергетично обидва можуть виглядати прийнятно, але ексергетично тепловий насос часто має перевагу у системі низькотемпературних споживачів.

2) Розрахунок керування і гнучкості. Для водонагрівачів і акумуляторів система автоматичного керування фактично стає невід’ємною частиною конструкції та визначає економічність і надійність системи в цілому.

👉 **Дослідження** способів керування водонагрівачами і тепловими насосами у поєднанні з системою теплової акумуляції прямо розглядають як спосіб економії та стабілізації мережі.

3) Інтеграція з високоточним тваринництвом. У сучасних господарствах системи мікроклімату та водопостачання все частіше пов’язують з даними датчиків і автоматизацією, що отримало назву високоточного (*англ.* PLF – Precision Livestock Farming, прецизійного) тваринництва. Науковий огляд 2025 року підкреслює, що керування середовищем (температура, вентиляція, вологість) прямо впливає на добробут і продуктивність тварин, а автоматизовані дані допомагають оптимізувати режими.

👉 **Цікаві факти.** Розрахунок за піком потужності без аналізу добового профілю часто призводить до завищення потужності у 1,5–2 рази і до погіршення техніко-економічних показників через роботу електрообладнання на неефективних режимах.

Для енергосистем, де частка відновлюваної генерації зростає, у розрахунках дедалі частіше враховують сценарій, де моделюється робота установки при провалах або, навпаки, піках генерації.

Отже, розрахунок конструктивних параметрів установок для підігрівання води є багатофакторним інженерним завданням, що поєднує теплотехнічні, електротехнічні та конструктивні аспекти проектування. Його результатом є визначення оптимальних геометричних і енергетичних характеристик обладнання, які забезпечують ефективну та надійну роботу систем гарячого водопостачання тваринницьких підприємств.

1.4 Зміст розрахунку електротермічних установок

Зміст розрахунку електротермічних установок для підігрівання води охоплює сукупність теплотехнічних, електричних та економічних розрахунків,

спрямованих на обґрунтування параметрів обладнання, режимів його роботи та показників енергоефективності. Комплексність такого розрахунку зумовлена необхідністю врахування взаємозв'язку теплових процесів, електричних навантажень та технологічних вимог тваринницького виробництва.

Теплотехнічна частина розрахунку передбачає визначення теплового балансу установки, який включає кількість теплоти, необхідної для нагрівання води, теплові втрати в навколишнє середовище та коефіцієнт корисної дії системи. Вона базується на рівняннях теплопередачі, що описують процеси конвекції, теплопровідності та теплового випромінювання. Особлива увага приділяється визначенню температурних режимів роботи обладнання та забезпеченню стабільності температури води на виході з установки.

Електрична частина розрахунку включає визначення необхідної встановленої потужності, струмових навантажень, перерізів кабельних ліній та параметрів захисної апаратури. Важливим етапом є аналіз режимів роботи установки – тривалого, повторно-короткочасного або імпульсного, що впливає на вибір електрообладнання та систем автоматичного керування. При цьому враховується коефіцієнт попиту та коефіцієнт використання потужності, що дозволяє оптимізувати навантаження на електричну мережу підприємства.

Економічна складова розрахунку спрямована на оцінку питомих витрат електроенергії, терміну окупності обладнання та загальної вартості життєвого циклу установки. У сучасних умовах значну роль відіграє аналіз можливості використання відновлюваних джерел енергії та систем акумулювання теплоти, що дозволяє зменшити експлуатаційні витрати та підвищити енергетичну автономність тваринницьких комплексів.

Зміст розрахунку також включає визначення показників надійності та безпеки експлуатації, зокрема оцінку ризиків перегріву, електричних пробойів, утворення накипу та корозійних процесів. Для цього застосовуються методи технічної діагностики та прогнозування ресурсу нагрівальних елементів. У європейській інженерній практиці активно впроваджуються цифрові двійники електротермічних установок, що дозволяють моделювати їх роботу в реальному часі та оптимізувати режими експлуатації.

Отже, зміст розрахунку електротермічних установок для підігрівання води є багаторівневим інженерним процесом, який охоплює теплотехнічні, електричні, економічні та експлуатаційні аспекти. Комплексний підхід до розрахунку забезпечує обґрунтований вибір параметрів обладнання, підвищення енергоефективності та надійності систем гарячого водопостачання в сучасному тваринництві.

Контрольні запитання до теми 1

1. Які функції виконують електротермічні установки для підігріву води у тваринництві?
2. Які існують основні способи електричного нагріву води та їх переваги?
3. Які фактори впливають на вибір способу нагріву води на фермах?
4. У чому полягають особливості резистивного, електродного та індукційного нагріву?
5. Які параметри визначають теплове навантаження водонагрівальної установки?
6. Як здійснюється розрахунок конструктивного об'єму водонагрівального резервуара?
7. Яке значення має теплоізоляція для енергоефективності установок?
8. Які електричні параметри враховують при проектуванні електротермічних установок?
9. Які етапи входять до комплексного розрахунку електротермічної установки?
10. Які сучасні енергоефективні технології використовуються у водонагрівальних системах тваринництва?

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

2.1 Установки для обігріву приміщень

Електротермічні установки для обігріву приміщень тваринницьких підприємств призначені для створення та підтримання нормативного мікроклімату, який забезпечує оптимальні умови утримання тварин, підвищення їх продуктивності та зниження витрат кормів на одиницю продукції. Формування необхідного теплового режиму у приміщеннях для утримання великої рогатої худоби, свиней, птиці та інших видів сільськогосподарських тварин є важливим технологічним завданням, оскільки температурно-вологісні параметри повітря безпосередньо впливають на фізіологічні процеси, рівень метаболізму та імунний статус тварин.

Електрообігрів приміщень у тваринництві характеризується високою керованістю, можливістю автоматичного регулювання теплової потужності, відсутністю локальних продуктів згоряння та підвищеною екологічною безпекою. На відміну від традиційних систем водяного або повітряного опалення з використанням твердого чи газоподібного палива, електротермічні установки дозволяють забезпечити рівномірний розподіл температурного поля у приміщенні та оперативно реагувати на зміну теплового навантаження, обумовлену зміною зовнішніх кліматичних умов або технологічних режимів утримання тварин.

До складу електротермічних установок для обігріву приміщень входять електронагрівальні елементи різних типів, системи живлення, засоби автоматичного керування та регулювання, а також датчики контролю температури та вологості повітря. Залежно від способу передачі теплоти у приміщення розрізняють системи прямого та непрямого електрообігріву. У системах прямого електрообігріву теплота виділяється безпосередньо у зоні розміщення тварин, тоді як у системах непрямого обігріву теплота передається через проміжний теплоносіє (повітря або вода).

У практиці тваринництва широко застосовуються такі типи електротермічних установок для обігріву приміщень: електричні повітрянагрівачі, електрокалорифери, інфрачервоні обігрівачі, електричні теплові панелі, кабельні системи підігріву підлоги та комбіновані системи обігріву. Електрокалорифери забезпечують нагрівання припливного повітря у системах вентиляції, що дозволяє одночасно вирішувати задачі обігріву та повітрообміну. Інфрачервоні обігрівачі створюють локальні теплові зони, особливо ефективні для обігріву молодняку, поросят або птиці у перші періоди їх розвитку.

Важливою особливістю електротермічних установок є можливість зонального обігріву приміщень. У великих тваринницьких комплексах температурні вимоги різних технологічних зон (зона відпочинку, годівлі, молодняку) можуть істотно відрізнятися, тому використання локальних електронагрівальних приладів дозволяє оптимізувати енергоспоживання та забезпечити комфортні умови для кожної групи тварин. Застосування автоматизованих систем керування дозволяє реалізувати індивідуальні температурні графіки залежно від віку, маси та фізіологічного стану тварин.

Ефективність електротермічних установок для обігріву приміщень визначається їх теплотехнічними характеристиками, надійністю, економічністю та можливістю інтеграції у загальну систему автоматизованого керування мікрокліматом. При проектуванні таких установок необхідно враховувати теплові втрати через огорожувальні конструкції, інфільтрацію холодного повітря, тепловиділення від тварин, а також особливості режимів вентиляції. Комплексний підхід до розрахунку та вибору електротермічних установок дозволяє забезпечити енергетично ефективне функціонування систем обігріву та створити стабільні мікрокліматичні умови у приміщеннях тваринницьких підприємств.

Сучасні підходи до роботи систем теплопостачання приміщень переносять фокус з підтримання середньої температури повітря на тепловий комфорт з урахуванням біології тварин, а також на енергоефективність при змінних умовах зовнішнього середовища. Такий сучасний підхід виражається у використанні:

1): променевого (інфрачервоного) обігріву зон перебування. Інфрачервоні обігрівачі ефективні як зональний обігрів: нагрівається поверхня (підстилка, тіла тварин), а не весь об'єм повітря. Перевага такого підходу – менші втрати на вентиляцію, а недолік – складність забезпечення рівномірності та уникнення локального перегріву або пересушування. У наукових роботах з мікроклімату підкреслюється, що керування кліматом тісно пов'язане з добробутом і продуктивністю тварин та енергоспоживанням систем;

2) теплових насосів та утилізації теплоти вентиляції. Висока кратність повітрообміну у тваринницьких приміщеннях означає істотні вентиляційні втрати. Використання рекуперації тепла системи витяжної вентиляції з подальшою його утилізацією на тепловому насосі дозволяє частково повертати теплоту та знижувати витрати на опалення. Для агрокомплексів, зокрема в Україні, є публікації про підвищення енергоефективності теплопостачання через впровадження теплових насосів типу «повітря-вода»;

3) електричних систем з акумуляцією теплоти за аналогією з системою підігріву рідини (див. тему 1). Електроопалення з акумуляцією тепла (наприклад, у теплоаккумуляторах), підігрів теплоносія у нічний час дозволяє вирівнювати навантаження і працювати у межах дешевшого тарифу. Тема гнучкості теплових насосів і теплових мереж активно розглядається в міжнародних звітах (наприклад, IEA HPT – International Energy Agency Heat Pumping Technologies).

2.2 Обґрунтування, розрахунок та вибір системи і виду електрообігріву

Обґрунтування системи електрообігріву приміщень у тваринництві базується на аналізі теплового балансу будівлі, технологічних вимог до мікроклімату, конструктивних особливостей приміщення та економічних показників експлуатації. Основним завданням є визначення необхідної теплової потужності системи обігріву, яка забезпечує компенсацію тепловтрат та підтримання заданої температури внутрішнього повітря за найхолодніших розрахункових умов.

Розрахунок теплового навантаження приміщення здійснюється на основі рівняння теплового балансу, що враховує сумарні тепловтрати через

огороджувальні конструкції, втрати на вентиляцію та інфільтрацію повітря, а також внутрішні тепловиділення від тварин, обладнання та освітлення. Тепловтрати через огороджувальні конструкції визначаються з урахуванням площі стін, покрівлі, підлоги, коефіцієнтів теплопередачі та різниці температур внутрішнього і зовнішнього повітря. Втрати теплоти на вентиляцію залежать від об'єму повітрообміну, питомої теплоємності повітря та температурного перепаду.

Вибір виду електрообігріву визначається технологічними вимогами до розподілу температури у приміщенні. Для загального рівномірного обігріву застосовують повітряні системи з електрокалориферами, які забезпечують нагрівання припливного повітря у вентиляційних каналах. Такий підхід дозволяє підтримувати стабільну температуру у всьому об'ємі приміщення та забезпечує суміщення функцій вентиляції та обігріву. Однак у приміщеннях із значними об'ємами та нерівномірним розміщенням тварин доцільно використовувати комбіновані системи, що поєднують загальний повітряний обігрів із локальними інфрачервоними нагрівачами.

Інфрачервоні системи електрообігріву характеризуються тим, що теплота передається переважно випромінюванням безпосередньо до поверхонь тварин, підлоги та обладнання, минаючи нагрівання повітря. Це дозволяє знизити загальні тепловтрати та забезпечити комфортні умови у зоні розміщення тварин навіть при нижчій температурі повітря у приміщенні. Особливо ефективним є використання інфрачервоного обігріву у приміщеннях для утримання молодняку, де необхідно створювати локальні теплові зони з підвищеною температурою.

Кабельні системи підігріву підлоги застосовуються для забезпечення комфортних умов утримання тварин на підлогах із бетонним покриттям. Такі системи забезпечують рівномірний розподіл температури по площі підлоги, запобігають переохолодженню тварин та знижують ризик захворювань опорно-рухового апарату. Розрахунок потужності кабельної системи виконується з урахуванням питомої теплової потужності на одиницю площі, теплового опору конструкції підлоги та допустимих температурних режимів.

При виборі системи електрообігріву необхідно враховувати енергетичну ефективність, надійність, простоту експлуатації та можливість автоматизації. Використання сучасних систем автоматичного регулювання дозволяє підтримувати температуру у приміщенні на заданому рівні шляхом зміни потужності нагрівальних елементів залежно від сигналів температурних датчиків. Це забезпечує економію електричної енергії та підвищує стабільність мікроклімату.

Остаточний вибір системи електрообігріву здійснюється на основі техніко-економічного порівняння різних варіантів, що включає оцінку капітальних витрат, експлуатаційних витрат, терміну окупності та надійності роботи системи. Комплексний підхід до обґрунтування та розрахунку систем електрообігріву дозволяє забезпечити оптимальні умови утримання тварин при мінімальних енергетичних витратах.

Обґрунтування для тваринницьких приміщень доцільно вести як оптимізацію між: тепловою потребою (огороджувальні конструкції і система вентиляції), біологічними вимогами конкретної групи тварин (температурні зони, вологість, швидкість повітря), електричною інфраструктурою (потужність, резервування) та економічними складовими (капітальні CAPEX та експлуатаційні OPEX витрати).

👉 Сучасні **дослідження** спрямовані на переважне застосування «розумних» систем керування мікрокліматом за потребою і ефективністю. На практиці енергоспоживання визначається не лише типом нагрівача, але й тим, наскільки точно керуються всі системи енергоспоживання (вентиляція, обігрів тощо). Концепція PLF (Precision Livestock Farming) прямо пов'язує автоматизований збір даних з ефективнішим керуванням середовищем і зниженням енерговитрат.

👉 Трендом сучасних наукових **досліджень** у сфері, що розглядається у межах цієї теми є впровадження джерел відновлюваної енергетики, утилізації тепла як вторинного енергоресурсу у поєднанні з сезонною теплоаккумуляцією. Для тваринницьких об'єктів демонструють складні схеми, що включають використання СЕС як джерела живлення, теплового акумулятора та теплового

насосу з подвійним джерелом утилізованого тепла, що у даний час отримали пілотне застосування на одній з свиноферм ЄС. Такий підхід дозволяє компенсувати падіння ефективності одного джерела теплоти тривалою роботою через підключення альтернативного джерела та використання акумуляції.

 **Цікаві факти.** В реальних проєктах економічний ефект часто дає використання не більш потужного нагрівача, а правильне узгодження роботи всіх енергосистем (тепло- та електро-), у т. ч. систем вентиляції і обігріву (наприклад, керування кратністю повітрообміну залежно від вологості й газів).

Також зростає роль цифровізації систем автоматизованого керування енерготехнологічними процесами (SCADA), які дозволяють автоматично коригувати роботу енергосистем на оптимальних рівнях та при дотриманні потрібних параметрів мікроклімату (температури, відносної вологості, швидкості повітря тощо).

Контрольні запитання до теми 2

1. Яке призначення електротермічних установок для обігріву приміщень у тваринництві?
2. Які основні види електричних систем обігріву застосовуються у тваринницьких приміщеннях?
3. У чому полягають особливості інфрачервоного електрообігріву?
4. Як виконується розрахунок теплового балансу приміщення?
5. Які фактори враховують при виборі системи електрообігріву?
6. Які переваги мають кабельні системи підігріву підлоги?
7. Яку роль відіграють системи автоматичного регулювання температури?
8. Як впливає швидкість повітрообміну на ефективність електрообігріву тваринницьких приміщень?
9. У чому полягає відмінність між конвективним та променевим електрообігрівом з точки зору теплового комфорту тварин?
10. Які особливості враховуються при виборі систем електрообігріву для різних видів тварин (ВРХ, свині, птиця)?

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

3.1 Установки для обігріву ґрунту

Електротермічні установки для обігріву ґрунту застосовуються у рослинництві з метою прискорення проростання насіння, стимулювання росту рослин, підвищення врожайності та забезпечення раннього отримання продукції у тепличних господарствах. Обігрів ґрунту є важливим агротехнічним заходом, оскільки температура кореневої зони суттєво впливає на швидкість фізіологічних процесів у рослинах, засвоєння поживних речовин та формування кореневої системи.

Основу електротермічних установок обігріву ґрунту становлять електронагрівальні елементи, які розміщуються безпосередньо у шарі ґрунту або під ним. Найбільш поширеними є кабельні системи обігріву, що використовують нагрівальні кабелі з підвищеною волого- та механічною стійкістю. Кабелі укладаються на певній глибині у ґрунті за заданою схемою, що забезпечує рівномірний розподіл температури у кореневмісному шарі.

Електричний обігрів ґрунту дозволяє підтримувати оптимальний температурний режим незалежно від зовнішніх кліматичних умов. Це особливо важливо у ранньовесняний та осінній періоди, коли температура довкілля є недостатньою для нормального розвитку рослин. Використання систем обігріву ґрунту сприяє зменшенню строків вегетації, підвищенню енергії проростання насіння та отриманню стабільних урожаїв у захищеному ґрунті.

До складу установок обігріву ґрунту входять нагрівальні кабелі, теплоізоляційні шари, системи автоматичного керування та датчики температури ґрунту. Теплоізоляційний шар, що розміщується під нагрівальними елементами, запобігає втратам теплоти у глибші шари ґрунту та підвищує енергетичну ефективність системи. Автоматичні регулятори температури забезпечують підтримання заданого температурного режиму залежно від біологічних потреб вирощуваних культур.

Ефективність установок обігріву ґрунту визначається рівномірністю температурного поля, енергетичною ефективністю та надійністю роботи нагрівальних елементів у вологому середовищі. При проєктуванні таких систем необхідно враховувати теплопровідність ґрунту, його вологість, густину, а також агротехнічні вимоги конкретних культур. Рациональне застосування електротермічних установок обігріву ґрунту забезпечує підвищення продуктивності рослинництва та ефективне використання енергетичних ресурсів.

👉 Сучасна тенденція наукових **досліджень** у тепличному виробництві – зміщення фокусу з нагрівання всього об'єму теплиці на підігрів прикореневої зони, оскільки це часто енергетично дешевше при збереженні показників розвитку рослин. Підігрів прикореневої зони зараз досліджується максимально. У дослідженнях 2024 року моделюють системи каналів, труб, кабелів під ґрунтом, а також поєднання з використанням **PCM матеріалів**, що перерозподіляють теплові навантаження за рахунок фазових переходів: акумулюють теплоту при плавленні та віддають при кристалізації, підтримуючи більш стабільну температуру ґрунту та загалом дозволяють згладжувати температурні коливання. Перевага цього методу – зниження пікової потужності та більш стабільний температурний режим для кореневої системи, а недолік – складність вибору матеріалу і довгострокова стабільність.

Інший сучасний напрямок у технологіях підігріву ґрунту – використання гібридних тепличних систем з генерацією електроенергії від сонячних (PVT) та геотермальних (geothermal) джерел. У дослідних випробуваннях у наукових публікаціях описують приклад теплиці для вирощування полуниць, де використано гібридну систему «PVT + geothermal + тепловий насос».

Третій сучасний напрям розвитку технологій підігріву ґрунту полягає у використанні електричних нагрівальних кабелів з інтелектуальним керуванням. Тут дослідження зосереджені на оптимізації розкладки кабелю, глибини прокладання, керування за датчиками температури і вологості ґрунту та тарифами на електроенергію за умови наявності можливості підключення

багатозонних лічильників електроенергії. Переваги наряду у точності і простоті, а недоліки у ризику локальних пересушувань, деградація ізоляції при агресивних середовищах, підвищені вимоги до електробезпеки у вологому середовищі.

👉 **Цікаві факти.** Підігрів прикореневої зони часто дозволяє знизити температуру повітря у теплиці без втрати інтенсивності розвитку рослини, тому що коренева система отримує оптимальні умови для поглинання води і поживних мінеральних речовин.

У теплицях ключовий ворог енергоефективності – не лише втрати через огородження, але й провали керування вночі, що спричиняють перегрівання або недогрівання рослин, тому датчики і керування повинні використовуватися, утворюючи цілісну систему автоматичного управління.

3.2 Обґрунтування, розрахунок та вибір системи і виду електрообігріву

Обґрунтування системи електрообігріву ґрунту базується на аналізі агротехнічних вимог до температури кореневої зони, теплотехнічних властивостей ґрунту та кліматичних умов експлуатації. Основною метою розрахунку є визначення необхідної теплової потужності, що забезпечує підтримання оптимальної температури ґрунту у заданому інтервалі протягом усього періоду вирощування рослин.

Розрахунок теплового режиму ґрунту здійснюється з урахуванням теплопровідності, теплоємності та вологості ґрунту, які суттєво впливають на процеси теплопереносу. Тепловий баланс системи включає надходження теплоти від нагрівальних елементів та втрати теплоти у довкілля. Особливістю обігріву ґрунту є наявність значної теплової інерційності, що зумовлює необхідність використання систем автоматичного регулювання температури з урахуванням запізнення теплових процесів.

Вибір виду електрообігріву ґрунту залежить від площі теплиць, глибини залягання кореневої системи рослин, типу ґрунту та економічних показників експлуатації. Найбільш поширеним є використання резистивних нагрівальних

кабелів, які забезпечують стабільне тепловиділення та високу надійність роботи. Альтернативним варіантом є застосування саморегулюючих нагрівальних кабелів, які змінюють теплову потужність залежно від температури довкілля, що дозволяє підвищити енергетичну ефективність системи.

При проектуванні систем електрообігріву ґрунту необхідно враховувати схему укладання нагрівальних кабелів, відстань між ними, глибину розміщення та наявність теплоізоляційного шару. Ці параметри визначають рівномірність розподілу температури та загальну ефективність системи. Оптимальний вибір конструктивних параметрів дозволяє забезпечити стабільний тепловий режим ґрунту при мінімальних витратах електричної енергії.

Техніко-економічне обґрунтування системи обігріву ґрунту включає аналіз капітальних витрат на встановлення нагрівальних елементів, витрат електроенергії під час експлуатації та очікуваного підвищення врожайності. Комплексний підхід до розрахунку та вибору систем електрообігріву ґрунту забезпечує ефективне використання електричної енергії та створення оптимальних умов для розвитку рослин.

👉 Сучасні дослідження пов'язані із використанням низькотемпературних джерел тепла і теплових насосів. Вибір теплового насоса для тепличних комплексів все частіше розглядається як вибір джерела теплоти (повітря, ґрунт, вода або стоки) і сценарію сезонної роботи. Публікації про оцінку ефективності використання відновлюваних низькотемпературних джерел для широкого впровадження теплових насосів у тепличному господарстві дають надію на якнайшвидше впровадження такого підходу.

👉 **Цікаві факти.** У теплицях інколи вигідніше зберігати теплоту у ґрунті або масиві (теплова інерція) і керувати піками, ніж постійно підтримувати високу температуру повітря.

РСМ-вставки в кореневих системах досліджують саме як спосіб пасивного керування, щоб замінити дороговартісну автоматику використанням фізики фазових переходів.

Контрольні запитання до теми 3

1. Яке призначення установок електрообігріву ґрунту у рослинництві?
2. Які типи нагрівальних елементів застосовують для обігріву ґрунту?
3. Які фактори впливають на тепловий режим ґрунту?
4. У чому полягають особливості теплового балансу систем обігріву ґрунту?
5. Які переваги мають саморегулюючі нагрівальні кабелі?
6. Які параметри враховують при виборі схеми укладання кабелів?
7. Як впливає вологість ґрунту на ефективність електрообігріву та теплоперенос?
8. У чому полягають переваги використання фазозмінних матеріалів (PCM) у системах обігріву ґрунту?
9. Які ризики пов'язані з перегрівом кореневої системи рослин і як їх уникнути?
10. Як змінюється тепловий режим ґрунту при використанні різних схем укладання нагрівальних кабелів?

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

4.1 Електротеплова обробка сільськогосподарської продукції

Електротеплова обробка сільськогосподарської продукції є важливою складовою сучасних технологічних процесів у рослинництві, що забезпечує підвищення якості продукції, продовження термінів її зберігання, зниження втрат та покращення санітарно-гігієнічних показників. Застосування електричної енергії як джерела теплоти дозволяє забезпечити високий ступінь керованості процесів нагріву, точне підтримання температурних режимів, рівномірність прогрівання продукції та можливість автоматизації технологічних операцій.

Електротеплова обробка включає широкий спектр процесів, серед яких сушіння зерна, теплову обробку насіння перед посівом, пастеризацію та підігрів кормів, термічну обробку овочевої та плодово-ягідної продукції, а також технологічні операції, пов'язані з підготовкою сировини до переробки. Основною метою таких процесів є зміна фізико-хімічних властивостей продукції під дією температури для досягнення необхідних технологічних параметрів.

В електротермічних установках для обробки продукції використовуються різні способи нагріву (перетворення електричної енергії у теплову): резистивний, індукційний, діелектричний, інфрачервоний, мікрохвильовий (радіочастотний) та комбінований. Резистивний нагрів є найбільш поширеним і базується на виділенні теплоти при проходженні електричного струму через нагрівальні елементи. Індукційний нагрів застосовується для обробки металевих елементів обладнання або тари, а діелектричний – для нагрівання продукції з високим вмістом води за рахунок діелектричних втрат у високочастотному електричному полі.

Особливістю електротеплової обробки є можливість реалізації інтенсивних режимів нагріву з мінімальними втратами теплоти у довкілля. Наприклад, інфрачервоне нагрівання дозволяє безпосередньо передавати теплову енергію

поверхневим шарам продукції, що сприяє скороченню тривалості обробки та збереженню біологічно активних речовин. Це особливо важливо при обробці насіння, овочів та плодів, де необхідно забезпечити делікатний тепловий вплив без руйнування структури тканин.

Електротеплова обробка продукції також відіграє важливу роль у технологіях зберігання. Підігрів повітря у зерносховищах, сушильних камерах та овочесховищах дозволяє регулювати вологість і температуру середовища, що запобігає розвитку мікроорганізмів, самозігріванню та псуванню продукції. Використання електричних систем нагріву забезпечує стабільність параметрів мікроклімату та можливість дистанційного контролю режимів зберігання.

Застосування електротеплових установок у технологічній обробці сільськогосподарської продукції забезпечує підвищення ефективності виробництва, зниження енергетичних витрат та покращення якості кінцевого продукту. Рациональний вибір способу нагріву та режимів обробки дозволяє оптимізувати технологічні процеси та забезпечити відповідність продукції встановленим стандартам якості.

Сучасний тренд електротеплової обробки – інтенсифікація тепломасообміну з мінімізацією втрат якості продукції.

Омічний нагрів – один з найбільш поширених – це нагрів продукту струмом провідності у результаті чого у об'ємі нагрівального елемента виділяється тепло, та конвективно-кондуктивним способом (залежно від виду продукту) передається для швидкого нагрівання продукції. Огляди 2024 р. підкреслюють сучасні тенденції щодо використання комбінованих нагрівних установок, що поєднують мікрохвильовий спосіб на кілогерцових частотах та використання підвищених напруженостей електричного поля, а також поєднання помірних постійних електричних полів з імпульсними електричними полями. Переваги такого методу: швидке і відносно рівномірне нагрівання, потенційно менші теплові пошкодження. Недоліки: залежність від електропровідності продукту, складність електродів і санітарії, ризики локальних перегрівів при неоднорідності.

Інший сучасний підхід – використання для нагріву імпульсних електричних полів, відомий як **PEF**. Цей метод не стільки про безпосереднє нагрівання, скільки спосіб здійснення електропорації (руйнування електричним полем) клітинних мембран, що підвищує масоперенос при сушінні або екстракції та дозволяє інактивувати мікроорганізми при помірних температурах. У 2024 р. PEF описують як одну з найбільш перспективних нетеплових технологій інактивації мікроорганізмів у харчових процесах. Його переваги у збереженні якості, прискоренні дифузії рідкої частини продукту, недоліки – висока вартість обладнання, необхідність точного вибору режимів і електробезпека.

Гібридні технології сушіння та обробки продукції є ще однією сучасною технологією. Огляди 2025 р. підкреслюють розвиток мікрохвильового, радіочастотного, інфрачервоного, ультразвукового, а також холодної плазми під час сушіння, з фокусом на збереження біоактивних компонентів. Сучасні гібридні технології з використанням високоінтенсивного ультразвуку розглядають як шлях підвищення виходу готового продукту та економії енергії під час сушіння або екстракції.

 **Цікаві факти.** Аналіз сучасних наукових публікацій ілюструє стале зростання досліджень щодо омічного нагрівання, що відображає активну фазу досліджень і пошук нових промислових ніш.

Ефект PEF часто проявляється як підготовка продукту: навіть якщо PEF сам майже не нагріває, він може суттєво прискорити подальше сушіння або екстракцію, тобто зменшити питомі витрати енергії та кінцеву собівартість готового продукту.

4.2 Теплова обробка

Теплова обробка сільськогосподарської продукції є технологічним процесом, що передбачає зміну її температурного стану з метою досягнення необхідних фізичних, хімічних або біологічних властивостей. У рослинництві теплова обробка застосовується для сушіння, пастеризації, знезараження, прогрівання перед зберіганням або переробкою, а також для стимулювання біохімічних процесів у насінні.

Сушіння зерна є одним з найбільш енергоємних процесів теплової обробки. Застосування електротермічних установок для сушіння дозволяє забезпечити точне регулювання температури сушильного агента, рівномірність висушування та мінімізацію втрат поживних речовин. Електричні сушарки можуть працювати у різних режимах – конвективному, інфрачервоному або комбінованому, що дозволяє адаптувати процес до конкретного виду продукції та її початкової вологості.

Пастеризація та тепла обробка кормів забезпечують знищення патогенних мікроорганізмів та підвищення засвоюваності поживних речовин. Електричні нагрівальні установки дозволяють підтримувати стабільні температурні режими, необхідні для ефективної пастеризації, що особливо важливо у виробництві кормових сумішей для тварин та птиці.

Важливою особливістю теплової обробки є необхідність забезпечення рівномірного прогрівання продукції по всьому об'єму. Нерівномірність температурного поля може призвести до перегрівання окремих ділянок і недогрівання інших, що негативно впливає на якість продукції. Тому при проєктуванні електротермічних установок особлива увага приділяється організації руху теплоносія, розміщенню нагрівальних елементів та системам автоматичного регулювання температури.

Теплова обробка продукції при зберіганні також включає підтримання оптимальних температурних режимів у сховищах. Використання електричних систем нагріву дозволяє запобігати переохолодженню продукції у зимовий період та забезпечувати стабільні умови зберігання, що зменшує втрати та покращує товарні властивості продукції.

Рациональне застосування теплової обробки на основі електротермічних установок сприяє підвищенню ефективності технологічних процесів у рослинництві, забезпечує енергозбереження та покращення якості сільськогосподарської продукції.

Теплова обробка під час зберігання та переробки (сушінні, пастеризації, бланшуванні, термостабілізації) в сучасній інженерії все частіше розглядається через

критерії енергоефективності, збереження якості, мікробіологічної безпеки та інтеграції з відновлюваними джерелами теплоти.

👉 Сучасні напрями наукових **досліджень** спрямовані на використання низькотемпературного сушіння з утилізацією теплоти. Наукові публікації 2025 р. оцінюють поєднання сушіння (наприклад, кормів або фуражу) з утилізацією низькопотенційної теплоти на молочній фермі (використання теплоти чилера – охолоджувача молока) або теплоти системи вентиляції, що дозволяє підвищити загальну енергоефективність сільськогосподарського підприємства. Основна ідея такого підходу полягає у зменшенні використання первинного тепла або палива, замінивши його джерелом вторинного тепла, а електрична енергія використовується лише для приводу компресора та вентиляторів.

Другий сучасний напрям полягає у електрифікації теплових процесів використанням теплових насосів, що живляться від сонячної електростанції. Для процесів, де потрібна теплота заданої високої температури, досліджують схеми «тепловий насос + сонячний колектор» як шлях зменшення площ колекторів та підвищення стабільності температури. Це прямо переноситься на агротехнологічні процеси з температурними рівнями 40–90 °С, пов'язані із сушінням повітря, нагріванням води або миттям.

Третій напрям пов'язаний із контролем якості через цифровізацію процесу сушіння, що забезпечує контроль кінетики сушіння, вологості продукту, прогнозування його кінцевих властивостей і адаптивне керування потужністю. Це дозволяє зменшити пересушування і знизити витрати теплової енергії.

👉 **Цікаві факти.** У технологіях низькотемпературного сушіння головний бар'єр не фізика процесу, а масштабування і економіка. Наукові публікації 2025 р. прямо підкреслюють, що оптимізація параметрів та впровадження промислових процесів залишаються ключовим викликом.

Для забезпечення енергоефективності сушіння часто вирішальним є не нагрівач, а правильний контроль вологовмісту вихідного повітря і використання рекуперації, тобто спрямовані, у першу чергу, на енергозбереження.

Контрольні запитання до теми 4

1. Яке призначення електротеплової обробки сільськогосподарської продукції?
2. Які способи електричного нагріву застосовуються у технологічній обробці продукції?
3. У чому полягають особливості інфрачервоного нагріву?
4. Яку роль відіграє теплова обробка при сушінні зерна?
5. Які вимоги висуваються до рівномірності температурного поля під час теплової обробки?
6. Як електротермічні установки використовуються у процесах зберігання продукції?
7. Які фактори впливають на рівномірність нагріву продукції при електротепловій обробці?
8. У чому полягають відмінності між традиційними та імпульсними методами електричної обробки продукції?
9. Як електротеплові процеси впливають на біологічну цінність сільськогосподарської продукції?
10. Які переваги мають комбіновані методи сушіння (ІЧ + НВЧ + ультразвук)?

Тема 5. ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ НА РЕМОНТНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ. ЕЛЕКТРИЧНІ ПЕЧІ

5.1 Номенклатура печей

Електричні печі є основним видом електротермічних установок, що застосовуються на ремонтних підприємствах для термічної обробки деталей, відновлення властивостей матеріалів, сушіння ізоляції, нагрівання заготовок перед механічною обробкою та виконання інших технологічних операцій. Номенклатура електричних печей включає широкий спектр установок, що відрізняються за призначенням, способом нагріву, конструктивним виконанням та режимами роботи.

За способом нагріву електричні печі поділяють на печі опору, індукційні печі, дугові печі, електронно-променеві та плазмові печі. Найбільш поширеними на ремонтних підприємствах є печі опору, у яких теплота виділяється внаслідок проходження електричного струму через нагрівальні елементи з високим електричним опором. Такі печі використовуються для відпалу, нормалізації, гартування та відпуску металевих деталей.

Індукційні печі застосовуються для швидкого нагрівання металевих заготовок за рахунок індукованих вихрових струмів у матеріалі. Вони характеризуються високою швидкістю нагріву, можливістю локального нагрівання та високою енергоефективністю. Дугові печі використовуються для плавлення металів та проведення високотемпературних технологічних процесів, однак на ремонтних підприємствах вони застосовуються рідше через складність обладнання та високі енергетичні витрати.

За **конструктивним виконанням** електричні печі поділяють на камерні, шахтні, тунельні, муфельні та конвеєрні. Камерні печі є універсальними та широко застосовуються для термічної обробки деталей різних розмірів. Шахтні печі використовуються для нагрівання довгомірних заготовок, а тунельні та конвеєрні печі – для безперервної термічної обробки великої кількості однотипних виробів.

Отже, номенклатура електричних печей на ремонтних підприємствах визначається різноманітністю технологічних процесів, що виконуються, та вимогами до температурних режимів, продуктивності та точності регулювання температури.

Сучасний розвиток електропечей визначається не лише механічною конструкцією, а й матеріалами нагрівачів, цифровим керуванням і вимогами до якості термообробки.

Нагрівачі нового покоління використовують SiC (карбід кремнію), MoSi₂ (дисиліцид молібдену) для високих температур. Вони також забезпечують вищі температурні рівні та ресурс, але вимагають грамотного керування режимами розігріву та охолодження і захисту від термошоків.

Печі з керованою атмосферою базуються на інтеграції газових систем, контролю кисню (O₂-сенсори), вологовмісту та потенціалу вуглецю.

Електровакуумні печі та печі для пайки у захисних атмосферах (особливо актуально для високоякісних ремонтів та інструментальних сталей).

Сучасні електропечі мають цифрове керування (програмований логічний контролер), можливість запису термограм, відстеження партій, що стає частиною системи якості продукції.

 **Цікаві факти.** У сучасних ремонтних виробництвах якість термообробки часто визначається не максимальними температурами, а відтворюваністю кривої нагріву – витримки – охолодження і стабільністю атмосфери.

Навіть у печах опору найбільший приріст якості часто дає перехід від простого термореле до керування за профілем, оскільки зменшується перегрів і деформації заготовок.

5.2 Обґрунтування та вибір способу нагріву

Вибір способу нагріву в електричних печах на ремонтних підприємствах визначається технологічними вимогами до процесу термічної обробки, характеристиками матеріалу деталей, необхідною швидкістю нагрівання та

економічними показниками експлуатації. Основними критеріями вибору є рівномірність температурного поля, точність регулювання температури, енергетична ефективність та надійність роботи обладнання.

Печі опору доцільно застосовувати для більшості процесів термічної обробки, що потребують плавного нагрівання та стабільного підтримання температури. Вони забезпечують високу рівномірність температурного поля та простоту регулювання режимів роботи. Індукційний нагрів обирають у випадках, коли необхідно забезпечити швидке локальне нагрівання металевих деталей, наприклад при поверхневому гартуванні або пайці.

Дуговий нагрів застосовується у процесах плавлення металів або високотемпературної обробки, коли потрібні температури, що перевищують можливості печей опору. Однак використання дугових печей потребує складніших систем керування та підвищених вимог до електроживлення.

Обґрунтування вибору способу нагріву включає аналіз теплових процесів, що відбуваються у печі, та розрахунок енергетичних витрат. Важливим є врахування енергоефективності печі, тепловтрат через футерівку, а також тривалості технологічного циклу. Рациональний вибір способу нагріву дозволяє забезпечити необхідні технологічні параметри при мінімальних витратах електричної енергії.

Вибір способу нагріву у ремонтній термообробці сьогодні є балансом між температурним діапазоном, однорідністю поля температур, вимогами до атмосфери, швидкістю циклу та енергетичними витратами.

У сучасних умовах використання електропечей на перший план виходять енергоменеджмент на підприємстві і гнучкість технологічного процесу. Печі є потужними споживачами електроенергії. У енергосистемах, що мають можливість автоматичного відслідковування та керування зростає інтерес до керування графіком термоциклів виходячи з наявних тарифів, піків генерації, аналогічно підходам у системах з тепловою акумуляцією.

Також розглядають комбінування традиційного резистивного нагріву з методами інтенсивного нагрівання. Для певних задач використовують індукційне нагрівання (швидке локальне нагрівання), а потім витримку в печі для

вирівнювання температурного поля. Перевага такого підходу полягає у зменшенні тривалості циклу, а недолік – більш складна технологічна лінія та підвищені вимоги до контролю результатів металургійної обробки.

👉 **Цікаві факти.** У багатьох ремонтних завданнях найбільші втрати якості спричиняє не недогрівання заготовки, а її окиснення, декарбюризація поверхні, тому контроль складу атмосфери у печі може бути важливішим за підвищення температури.

Перехід на сучасні матеріали нагрівачів часто дає додатковий непрямий ефект, що впливає не лише на вибір температурних режимів термообробки, але й на зниження простоїв обладнання.

5.3 Тепловий та електричний розрахунки печі

Тепловий розрахунок електричної печі спрямований на визначення необхідної теплової потужності для нагрівання виробів до заданої температури та компенсації тепловтрат у довкілля. Основою розрахунку є рівняння теплового балансу, яке враховує теплоту, необхідну для нагрівання виробів, теплоту нагрівання футерівки печі та втрати теплоти через стінки, отвори та інфільтрацію повітря.

Електричний розрахунок печі полягає у визначенні параметрів нагрівальних елементів, сили струму, напруги живлення та електричної потужності. При цьому враховують електричний опір нагрівальних елементів, допустиму щільність струму та умови тепловідведення. Розрахунок дозволяє визначити оптимальні параметри нагрівальних елементів, що забезпечують необхідний тепловий режим та довговічність роботи печі.

Комплексне виконання теплового та електричного розрахунків дозволяє забезпечити ефективну та надійну роботу електричних печей на ремонтних підприємствах, оптимізувати енергоспоживання та підвищити якість термічної обробки деталей.

👉 Сучасні напрямки **досліджень** електропечей полягають у моделюванні температурного поля. Для печей з критичними допусками використовують

числові моделі розподілу температури, що також враховують променевий теплообмін, щоб оптимізувати розташування нагрівачів, екранів, циркуляції газового середовища у об'ємі камери печі. Це підвищує однорідність нагрівання заготовок та зменшує кількість браку.

Другий сучасний напрямок полягає у керуванні потужністю печі та якістю електроенергії, що використовується для її нагрівання. Регулювання потужності через керований кремнієвий випрямляч підвищує точність підтримання профілю, але породжує гармоніки та вимоги до фільтрів/кабелювання. У багатьох випадках «електричний розрахунок» тепер включає також розрахунок впливу на мережу підприємства (просідання напруги, пуски, сумісність з іншими приводами).

Ще один сучасний напрям у якому здійснюється розвиток електропечей лежить у площині використання цифрової простежуваності і контролю якості. У розрахунок та проєктування входять датчики (термопари, оптичні пірометри тощо), реєстрація партій, розробка та оптимізація профілів керування.

 **Цікаві факти.** Зменшення втрат через футерівку інколи дає менший ефект, ніж оптимізація циклу: якщо піч довго працює вхолосту між партіями, то стратегія керування і логістика завантаження можуть зекономити більше, ніж додатковий шар ізоляції.

У багатьох виробництвах найслабше місце – не нагрівач, а контактні з'єднання та струмопідводи, які перегріваються через окиснення і перехідні опори, тому діагностика струмопідводів є практично важливим елементом сучасного підходу до надійності.

Контрольні запитання до теми 5

1. Які основні типи електричних печей застосовуються на ремонтних підприємствах?
2. У чому полягають особливості печей опору та індукційних печей?
3. Які критерії враховують при виборі способу нагріву?
4. Що включає тепловий розрахунок електричної печі?

5. Які параметри визначаються під час електричного розрахунку печі?
6. Які фактори визначають вибір типу електричної печі для конкретного технологічного процесу?
7. У чому полягають особливості теплового режиму камерних і шахтних печей?
8. Як впливає режим нагріву на структуру та властивості металу?
9. Які методи застосовуються для підвищення енергоефективності електричних печей?
10. Які сучасні напрями розвитку електропечей (індукційні, вакуумні, плазмові) є найбільш перспективними?

Тема 6. ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ УСТАНОВКИ НА РЕМОНТНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ. ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

6.1 Природа та властивості електричної дуги

Електрична дуга є одним із ключових фізичних явищ, що використовується в електротермічних установках ремонтних підприємств, зокрема в процесах електрозварювання, наплавлення та термічної обробки металів. З фізичної точки зору електрична дуга являє собою стійкий самопідтримуваний електричний розряд у газовому середовищі, який супроводжується інтенсивним виділенням теплоти, світлового випромінювання та іонізацією газу. Температура у зоні дуги може досягати 5000–20000 К, що забезпечує можливість плавлення металів і проведення високотемпературних технологічних процесів.

Формування електричної дуги відбувається при зближенні електродів до критичної відстані та прикладенні достатньої напруги, що викликає пробій міжелектродного проміжку. У результаті виникає плазмовий канал, який складається з іонізованих атомів і вільних електронів. Цей канал має високу електропровідність і забезпечує проходження значних струмів при відносно невеликій напрузі. Отже, дуга характеризується нелінійною вольт-амперною характеристикою та залежністю параметрів від довжини дугового проміжку, складу газового середовища та струму зварювання.

Властивості електричної дуги визначаються комплексом термічних, електричних і плазмових процесів. Важливими параметрами є напруга дуги, струм, довжина дуги, густина струму, а також коефіцієнти тепловіддачі в зоні контакту з металом. Дуга має високу концентрацію теплової енергії, що дозволяє локалізувати нагрів і мінімізувати термічні деформації деталей під час ремонту.

З технологічної точки зору електрична дуга може існувати в різних режимах: стабільному, нестабільному та перехідному. Стабільність горіння дуги є критично важливою для забезпечення якості зварного з'єднання. Вона залежить від характеристик джерела живлення, типу електрода, полярності струму та зовнішніх умов. У сучасних електрозварювальних установках

стабілізація дуги досягається за рахунок застосування джерел живлення з падаючою зовнішньою характеристикою та електронних систем керування.

Електрична дуга як плазмове явище сьогодні розглядається не лише як джерело теплоти, а як складна термодинамічна система, що поєднує явища теплопереносу, масопереносу та електромагнітної взаємодії.

👉 У сучасних дослідженнях дуга моделюється за допомогою рівнянь магнітогідродинаміки, що дозволяє прогнозувати розподіл температури, швидкість плазмового потоку та стабільність процесу горіння.

У сучасних технологіях активно розвиваються *плазмові дугові установки і гібридне лазерно-дугове зварювання*.

У ЄС (зокрема, Німеччина, Fraunhofer Institute) *досліджуються адаптивні дугові системи*, де параметри дуги регулюються у реальному часі за допомогою машинного навчання.

👉 Цікавим фактом є те, що плазма дуги має різну температуру в різних зонах:

- катодна зона: $\sim 3000\text{--}4000\text{ K}$;
- стовп дуги: до 20000 K ;
- анодна зона: $\sim 4000\text{--}6000\text{ K}$.

Це пояснює нерівномірність теплового впливу та важливість правильного вибору полярності струму.

Практичний приклад: у виробництві та ремонті сільськогосподарської техніки (John Deere, CNH Industrial) застосовуються *роботизовані дугові комплекси*, що забезпечують стабільність дуги навіть при зміні геометрії деталі.

6.2 Джерела живлення електрозварювального обладнання

Джерела живлення електрозварювального обладнання є спеціалізованими електротехнічними пристроями, що забезпечують формування необхідних електричних параметрів для стійкого горіння електричної дуги. Основними вимогами до таких джерел є можливість регулювання зварювального струму,

стабільність напруги дуги, надійність роботи та відповідність характеристик технологічним режимам зварювання.

Залежно від принципу дії джерела живлення поділяються на трансформаторні, випрямні, інверторні та генераторні. Трансформаторні джерела використовують змінний струм і відрізняються простотою конструкції та високою надійністю. Випрямні джерела забезпечують перетворення змінного струму в постійний, що дозволяє отримати більш стабільні режими зварювання та покращити якість шва.

Інверторні джерела живлення є найбільш сучасним видом обладнання, яке використовує високочастотне перетворення електричної енергії. Завдяки цьому досягається зменшення габаритів і маси пристроїв, підвищення ККД та можливість точного регулювання параметрів зварювального процесу. У ремонтних підприємствах інверторні джерела широко застосовуються для ручного дугового зварювання, аргонодугового зварювання та напівавтоматичних процесів.

Важливою характеристикою джерел живлення є їх зовнішня вольт-амперна характеристика, яка визначає поведінку струму при зміні напруги дуги. Для дугового зварювання найбільш доцільною є спадна характеристика, що забезпечує саморегулювання струму при зміні довжини дуги та підвищує стабільність технологічного процесу.

Сучасні джерела живлення еволюціонували від класичних трансформаторів до *цифрових інверторних систем із мікропроцесорним керуванням*. У таких системах реалізуються складні алгоритми формування струму, наприклад:

- *імпульсне зварювання*;
- *технологія Fronius* – перенесення металу з керованим зниженням тепловкладення (англ. CMT);
- адаптивне керування параметрами зварювальної дуги.

Інверторні джерела дозволяють:

- змінювати форму струму (синусоїдальна, прямокутна, імпульсна),
- адаптувати процес до матеріалу (алюміній, неіржавіюча сталь),
- зменшити тепловкладення на 20–40 %.

👉 **Цікавий факт:** сучасні інверторні джерела можуть працювати з частотою перетворення *до 100 кГц*, що в десятки разів вище ніж класичних трансформаторів.

Перспективні напрями розвитку технологій електрозварювання:

- ***DC microgrid welding systems*** (США) – живлення від локальних мереж постійного струму;
- інтеграція з ***аккумуляторами та ВДЕ (сонячні панелі)***;
- мобільні зварювальні установки для польових умов.

6.3 Технічні характеристики джерел живлення

Технічні характеристики джерел живлення електрозварювального обладнання визначають їх експлуатаційні можливості та придатність до використання у конкретних технологічних процесах ремонтного виробництва. До основних характеристик належать номінальний зварювальний струм, напруга холостого ходу, робоча напруга дуги, коефіцієнт корисної дії, тривалість навантаження та діапазон регулювання параметрів.

Номінальний зварювальний струм визначає максимальну силу струму, яку джерело може забезпечувати без перевищення допустимих температурних режимів. Напруга холостого ходу характеризує напругу на вихідних затискачах джерела при відсутності дуги і повинна бути достатньою для її запалювання. Робоча напруга дуги залежить від довжини дугового проміжку та типу електрода і є одним із ключових параметрів процесу зварювання.

ККД джерела живлення характеризує ефективність перетворення електричної енергії в енергію зварювального процесу. Високий ККД дозволяє зменшити втрати електроенергії та підвищити економічність експлуатації обладнання. Тривалість навантаження визначає відношення часу роботи джерела під навантаженням до загального часу циклу і є важливою характеристикою для оцінки режимів роботи.

Сучасні джерела живлення оснащуються системами електронного керування, що забезпечують стабілізацію струму, захист від перевантажень та

можливість програмування режимів зварювання. Це дозволяє підвищити якість зварних з'єднань і зменшити вплив людського фактора на технологічний процес.

У сучасній практиці до традиційних параметрів додаються нові характеристики:

- динаміка струму (di/dt) – важлива для імпульсних режимів;
- стабільність дуги;
- енергетична ефективність ($\eta > 90\%$ для інверторів);
- Power Factor Correction (*англ.* PFC)

Сучасні інвертори мають:

- $\cos\varphi \approx 0,95\text{--}0,99$;
- ККД до 92–96 %.

Практичний приклад: зварювальні інвертори компаній **ESAB, Fronius, Miller** мають функції:

- автоматичного підбору режиму (Smart Welding);
- пам'яті програм;
- дистанційного керування через IoT.

У США активно розвивається концепція «**connected Welding Systems**» (пов'язані системи зварювання) – зварювальні установки, що підключаються до хмарних сервісів для моніторингу.

6.4 Зварювальні трансформатори, зварювальні генератори

Зварювальні трансформатори є найпростішими і найбільш поширеними джерелами живлення для дугового зварювання змінним струмом. Вони забезпечують зниження напруги мережі до значень, необхідних для зварювального процесу, та формування спадної зовнішньої характеристики (про види характеристик див. конспект лекцій). Конструктивно трансформатори можуть мати рухомі магнітні шунти або регульовані обмотки, що дозволяє змінювати величину зварювального струму.

Зварювальні генератори використовуються для отримання постійного струму та застосовуються у випадках, коли необхідно забезпечити високу стабільність горіння дуги і можливість роботи в умовах експлуатації. Генератори

можуть приводитися у дію електродвигунами або двигунами внутрішнього згоряння, що забезпечує автономність роботи обладнання.

Порівняно із трансформаторами, генератори мають складнішу конструкцію, більшу масу та вартість, однак забезпечують кращі технологічні властивості зварювального струму. Вибір між трансформатором і генератором залежить від умов експлуатації, вимог до якості зварювання та наявності стаціонарного електропостачання.

Хоча трансформатори поступово витісняються інверторами, вони залишаються актуальними для:

- важких умов експлуатації;
- низької якості електромереж;
- простих ремонтних робіт.

Зварювальні генератори нового покоління:

- оснащуються *електронними стабілізаторами напруги*;
- працюють у гібридних режимах, що містять електродвигун та акумулятор енергії.

👉 Сучасні дослідження у галузі електрозварювання спрямовані на підвищення енергоефективності та зменшення масогабаритних показників та пов'язані із використанням:

• **магнітних матеріалів з аморфних сплавів** (наприклад, Metglas 2605SA1, Metglas 2605HB1, сплави Fe-Si-B), що дозволяє зменшити втрати енергії у 2–5 разів внаслідок особливих властивостей матеріалів: вузької петлі гістерезису та малої коерцитивної сили, легкого намагнічування, зменшених вихрових струмів, зменшеної енергії для перемагнічування, більш стабільних властивостей, рівномірності характеристик;

• **нанокристалічних сплавів** (FINEMET (Hitachi Metals), VITROPERM (VAC – Vacuumschmelze), **порошкових магнітопроводів** (Sendust (Fe-Si-Al), MPP (Molypermalloy Powder), High Flux (Fe-Ni) типів), що мають зменшені втрати енергії та стабільні характеристики;

• **високочастотних трансформаторів**, що дозволяє зменшити кількість витків обмотки та площу осердя трансформатора; такі трансформатори працюють у складі імпульсних джерел живлення. При цьому у трансформаторі зменшуються втрати у міді і сталі, що дозволяє забезпечити ККД на рівні 90–98 %, оптимізуються режими роботи, збільшується глибина регулювання потужності та забезпечується більш точне регулювання.

У ЄС розробляються:

- компактні генератори для агросектору;
- автономні зварювальні станції для польових ремонтів техніки.

6.5 Осцилятори

Осцилятори є допоміжними пристроями електрозварювального обладнання, що призначені для безконтактного запалювання та стабілізації електричної дуги. Вони генерують високочастотні імпульси високої напруги, які накладаються на основну зварювальну напругу і забезпечують іонізацію міжелектродного проміжку. Це дозволяє запалювати дугу без дотику електрода до деталі, що особливо важливо при аргонодуговому зварюванні.

Застосування осциляторів підвищує стабільність горіння дуги, зменшує зношування електродів та покращує якість зварного з'єднання. У сучасних установках осцилятори інтегруються в інверторні джерела живлення і працюють у автоматичному режимі, забезпечуючи оптимальні умови для початку та підтримання зварювального процесу.

Сучасні осцилятори працюють у діапазоні:

- частоти 0,5–5 МГц;
- напруга до 10 кВ.

Вони використовуються для:

- TIG-зварювання;
- плазмового різання;
- роботизованих зварювальних систем.

Нові технології електрозварювання пов'язані з використанням:

- безконтактних цифрових осциляторів;

- систем з адаптивною частотою;
- інтеграцією осциляторів в інверторні платформи.

 **Цікавий факт:** у високоточному виробництві (аерокосмічна галузь) застосовуються осцилятори, які забезпечують *запалювання дуги без електромагнітних перешкод*.

Контрольні запитання до теми 6

1. Що являє собою електрична дуга та які її основні властивості?
2. Які фактори впливають на стабільність горіння дуги?
3. Які типи джерел живлення застосовуються в електрозварювальному обладнанні?
4. Які основні технічні характеристики джерел живлення?
5. У чому полягають особливості зварювальних трансформаторів і генераторів?
6. Яке призначення осциляторів у зварювальних установках?
7. Як впливає зовнішня характеристика джерела живлення на процес зварювання?
8. Які переваги мають інверторні джерела живлення?
9. Які вимоги висуваються до джерел живлення з точки зору енергоефективності?
10. Які сучасні напрями розвитку джерел живлення для зварювання?

Тема 7. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОЇ ОБРОБКИ

7.1 Загальні відомості про електрофізичні методи обробки продукції

Електрофізичні методи обробки сільськогосподарської продукції базуються на використанні фізичних ефектів, що виникають під дією електричних і електромагнітних полів, електричних розрядів, імпульсних струмів та інших електричних впливів. На відміну від традиційних теплових методів, електрофізична обробка дозволяє здійснювати вплив на продукцію без значного підвищення температури, що сприяє збереженню її біологічної цінності та якості.

До основних електрофізичних методів належать обробка імпульсними електричними полями, електроіскрова, електроімпульсна, діелектрична, плазмова та електрогідрравлічна обробка. Ці методи знаходять широке застосування у передпосівній обробці насіння, знезараженні продукції, інтенсифікації процесів сушіння та переробки сільськогосподарської сировини.

Електрофізичні установки забезпечують високу інтенсивність впливу на продукцію при відносно невеликих енергетичних витратах. Наприклад, обробка насіння імпульсними електричними полями сприяє підвищенню схожості та енергії проростання, а також стимулює біохімічні процеси у клітинах. Такі технології активно розвиваються у країнах ЄС та США як складова концепції точного землеробства.

Електрофізичні технології сьогодні є одним із найдинамічніших напрямів розвитку аграрної інженерії. Вони входять до концепції **розумного** та **точного землеробства**.

👉 Сучасні напрямки досліджень і використання електрофізичних методів обробки продукції:

- **імпульсні електричні поля;**
- **холодна плазма** – це частково іонізований газ, у якому електрони мають високу енергію, тоді як важкі частинки (іони, нейтральні атоми, молекули)

залишаються при відносно низькій температурі (близькій до температури довкілля);

- **омічне нагрівання;**

- **електропорація** – це фізичний процес утворення тимчасових або постійних пор у клітинних мембранах під дією імпульсного електричного поля.

Розглянемо ці напрямки більш докладно.

Імпульсні електричні поля (англ. *PEF*) належать до сучасних електрофізичних методів обробки продукції, які реалізують цілеспрямований вплив короткочасних високовольтних електричних імпульсів на біологічні об'єкти та дисперсні системи. На відміну від традиційних електротермічних процесів, у яких домінує теплонадходження, у випадку PEF основний ефект обумовлений **електрофізичними та електробіологічними механізмами**, а нагрівання має допоміжний або небажаний характер і, як правило, мінімізується.

Фізична суть процесу полягає у прикладенні до продукту електричного поля високої напруженості (як правило 1–50 кВ/см) у вигляді коротких імпульсів тривалістю від наносекунд до мілісекунд. Під дією такого поля в клітинних мембранах виникає індукована різниця потенціалів, яка перевищує критичне значення, що призводить до **електропорації** – утворення нанометрових або мікрометрових пор у ліпідному бішарі мембрани. Ці пори можуть бути оборотними або необоротними залежно від параметрів поля, тривалості імпульсів та властивостей тканини.

У випадку оборотної електропорації відбувається тимчасове підвищення проникності клітинних мембран, що широко використовується для інтенсифікації масопереносу, наприклад, при екстракції внутрішньоклітинних компонентів (соків, біоактивних речовин). Необоротна електропорація призводить до руйнування клітин і використовується для інактивації мікроорганізмів, що робить PEF перспективною альтернативою термічній пастеризації.

Електрофізичний характер впливу визначає ключову перевагу технології – **мінімальний термічний вплив на продукт**. Це дозволяє зберігати природні органолептичні властивості, вітаміни, ферменти та структуру біополімерів. Саме

тому PEF розглядається як одна з провідних технологій *нетермічної обробки* у харчовій промисловості.

З точки зору апаратної реалізації установка імпульсних електричних полів складається з джерела високої напруги, накопичувача енергії (конденсаторної батареї), комутаційного пристрою (іскрові розрядники, напівпровідникові ключі на основі IGBT або MOSFET), а також оброблювальної камери з електродами. Геометрія електродів і характер електричного поля (однорідне чи неоднорідне) суттєво впливають на ефективність процесу, тому інженерне проектування таких систем є складною багатофакторною задачею.

У сільськогосподарському виробництві імпульсні електричні поля знаходять застосування у широкому спектрі технологічних процесів. До них належать інтенсифікація пресування та екстракції соків із рослинної сировини, підвищення ефективності сушіння за рахунок попереднього руйнування клітинних структур, знезараження рідких харчових продуктів, а також стимуляція проростання насіння. У переробній галузі PEF використовується для підвищення виходу цукру з буряка, екстракції поліфенолів, пігментів та інших цінних компонентів.

Сучасні дослідження у галузі імпульсних електричних полів спрямовані на підвищення енергоефективності установок, оптимізацію параметрів імпульсів та розширення спектру застосувань. Значна увага приділяється використанню *наносекундних імпульсів високої напруженості*, які дозволяють впливати не лише на мембрану, а й на внутрішньоклітинні структури. Такі режими досліджуються у біотехнологіях і медицині, зокрема для контрольованого впливу на клітинні органели.

Перспективним напрямком є інтеграція PEF з іншими технологіями, зокрема з ультразвуковою обробкою, холодною плазмою та електрохімічними методами, що дозволяє досягати синергетичного ефекту. Також активно розвиваються *установки безперервної дії*, придатні для промислового застосування, що забезпечують потокову обробку значних об'ємів продукції.

Серед цікавих фактів варто зазначити, що імпульсні електричні поля можуть забезпечувати мікробіологічну безпеку продуктів при значно нижчих

температурах, ніж традиційна пастеризація, що дозволяє зменшити втрати поживних речовин. Крім того, у деяких випадках РЕФ сприяє підвищенню біодоступності корисних компонентів, оскільки руйнування клітинних стінок полегшує їх засвоєння.

Отже, імпульсні електричні поля є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку електрофізичних методів обробки продукції, поєднуючи високу ефективність, енергоощадність і можливість збереження якості продукції, що особливо актуально для сучасного агропромислового виробництва та харчових технологій.

РЕФ-технологія широко застосовується для:

- підвищення виходу соку (до +20 %);
- прискорення сушіння;
- знезараження продукції.

👉 **Цікавий факт:** РЕФ дозволяє руйнувати клітинні мембрани без нагрівання (електропорація).

У ЄС:

- компанія Elea GmbH розробляє РЕФ-установки для агропереробки;
- РЕФ-установки використовуються у виробництві картопляних чипсів для зниження енерговитрат.

Холодна плазма належить до сучасних електрофізичних методів обробки продукції, що базуються на використанні іонізованого газу з високою реакційною здатністю при відносно низькій температурі важких частинок. На відміну від високотемпературної плазми, де температура всіх компонентів середовища є високою і близькою до термодинамічної рівноваги, холодна плазма (часто позначається як *не рівноважна або не термічна плазма, англ. NTP*) характеризується суттєвою різницею температур: електрони мають високу енергію, тоді як іони та нейтральні частинки залишаються мати температуру, близьку до температури довкілля. Саме це дозволяє використовувати холодну плазму для обробки біологічних об'єктів і харчової продукції без значного теплонадходження та термічного руйнування структури.

Фізична природа холодної плазми полягає у створенні електричного розряду у газовому середовищі під дією високої напруги. Залежно від параметрів живлення, геометрії електродів і складу газу реалізуються різні типи розрядів: бар'єрний розряд (*англ.* DBD), коронний розряд, плазмові струмені, мікророзряди. Найбільш поширеним у харчових і аграрних застосуваннях є бар'єрний розряд, де один або обидва електроди покриті діелектриком, що обмежує струм і забезпечує стабільність процесу.

У плазмі утворюється складна суміш активних компонентів: електрони, іони, радикали (зокрема, активні форми кисню (*англ.* ROS) та азоту (*англ.* RNS), збуджені молекули, ультрафіолетове випромінювання та локальні електричні поля. Саме сукупність цих факторів забезпечує багатфакторний вплив на об'єкт обробки. Важливо, що дія холодної плазми не обмежується лише поверхневим ефектом: активні частинки можуть проникати у пори та мікронерівності матеріалу, а також ініціювати вторинні хімічні реакції.

У контексті обробки сільськогосподарської продукції холодна плазма застосовується передусім для **зnezараження поверхні**, інактивації бактерій, вірусів, грибів та спор. Механізм інактивації включає окисне пошкодження клітинних мембран, денатурацію білків, руйнування ДНК і порушення метаболічних процесів. На відміну від традиційних хімічних дезінфектантів, плазма не потребує внесення сторонніх реагентів, а активні компоненти генеруються безпосередньо з газового середовища (повітря, кисень, азот, їх суміші).

Окрім зnezараження, холодна плазма використовується для модифікації поверхневих властивостей матеріалів. Під її дією змінюється енергія поверхні, змочуваність, адгезійні властивості, що важливо, наприклад, для пакувальних матеріалів або насіння. У рослинництві досліджується вплив плазмової обробки на стимуляцію проростання насіння, активацію ферментативних процесів та підвищення стійкості рослин до стресових факторів.

З інженерної точки зору установки холодної плазми включають джерело високої напруги (часто імпульсного або високочастотного типу), електродну систему, газову камеру або відкриту зону обробки, а також системи контролю

параметрів процесу. Важливими параметрами є напруженість електричного поля, частота і форма імпульсів, склад газу, тиск і тривалість обробки. У сучасних установках широко використовуються напівпровідникові ключі (IGBT, MOSFET), що дозволяє точно керувати режимами генерації плазми.

Сучасні наукові дослідження в галузі холодної плазми активно розвиваються у напрямку підвищення селективності та енергоефективності процесів. Значна увага приділяється вивченню механізмів утворення активних форм кисню та азоту, їх взаємодії з біологічними об'єктами, а також оптимізації режимів для різних типів продукції. Перспективним напрямком є використання так званої *плазм-активованої води* (англ. *PAW*), яка зберігає реакційну здатність після обробки і може застосовуватися як дезінфікуючий агент.

Іншим перспективним напрямком є інтеграція холодної плазми з іншими електрофізичними методами, такими як імпульсні електричні поля, ультразвук та електрохімічні процеси. Такі комбіновані технології дозволяють досягати синергетичного ефекту, зменшувати тривалість обробки та енергетичні витрати, а також розширювати функціональні можливості установок.

Серед цікавих фактів варто відзначити, що холодна плазма може ефективно інактивувати мікроорганізми навіть при кімнатній температурі, що робить її привабливою для обробки термочутливих продуктів. Крім того, плазмові технології активно досліджуються не лише у харчовій промисловості, але і у медицині, зокрема для стерилізації інструментів і навіть лікування ран (плазмотерапія).

Отже, холодна плазма є універсальним і високоефективним електрофізичним методом обробки продукції, який поєднує складні фізичні та хімічні механізми впливу, забезпечує високу якість обробки та має значний потенціал для подальшого розвитку і впровадження у агропромисловому комплексі.

Омічне нагрівання (англ. *OH*), також використовується термін **джоулеве нагрівання**, є одним із базових електрофізичних методів обробки продукції, який ґрунтується на безпосередньому перетворенні електричної енергії в теплову в об'ємі матеріалу при проходженні електричного струму. На відміну від

традиційних методів теплопередачі, де теплота передається від нагрівальної поверхні до продукту за рахунок теплопровідності, конвекції або випромінювання, при омичному нагріванні теплота генерується *всередині самого об'єкта* внаслідок його електричного опору.

Фізично процес описується *законом Джоуля–Ленца*, відповідно до якого кількість теплоти, що виділяється у провіднику, пропорційна квадрату сили струму, опору середовища та часу протікання струму. У харчових і біологічних середовищах провідність забезпечується іонною складовою, тому ефективність процесу суттєво залежить від концентрації електролітів, температури та структури продукту. Зі зростанням температури електропровідність, як правило, зростає, що може призводити до нелінійної динаміки процесу і потребує точного керування.

Однією з ключових переваг ОН є *об'ємний характер теплонадходження*, що забезпечує рівномірний розподіл температури навіть у продуктах із складною геометрією або неоднорідною структурою. Це *дозволяє значно скоротити тривалість теплової обробки, зменшити температурні градієнти та уникнути локального перегріву поверхні*, який характерний для традиційних методів. У результаті краще зберігаються харчова цінність, текстура та органолептичні властивості продукції.

З інженерної точки зору установка ОН включає джерело змінної напруги, електроди, між якими розміщується продукт, а також систему контролю параметрів процесу. Застосування змінного струму обумовлене необхідністю запобігання електролізу, поляризації електродів і небажаним електрохімічним реакціям, які можуть впливати на склад продукту. Частота струму та форма сигналу підбираються так, щоб забезпечити стабільність процесу та мінімізувати побічні ефекти.

ОН широко застосовується в харчовій промисловості для пастеризації, стерилізації, розморожування, бланшування, концентрування та приготування продуктів. Особливо ефективним воно є для рідких і напіврідких середовищ із дисперсними включеннями (наприклад, супи, соуси, фруктові пюре), де традиційні методи не забезпечують рівномірного прогріву. У рослинництві та

переробці сировини ОН використовується для інтенсифікації екстракції біологічно активних речовин, оскільки під дією електричного поля додатково відбувається порушення клітинних структур.

Сучасні дослідження в напрямку ОН спрямовані на підвищення енергоефективності та розширення функціональних можливостей технології. Значна увага приділяється розробці *комбінованих процесів*, у яких омічне нагрівання поєднується з імпульсними електричними полями, ультразвуком або мікрохвильовим нагріванням. Такі підходи дозволяють досягати синергетичного ефекту: наприклад, попередня електропорація клітин підвищує ефективність подальшого теплового впливу.

Перспективним напрямком є застосування ОН у системах **безперервної обробки**, що відповідає сучасним вимогам до автоматизації та масштабування виробництва. Також активно досліджуються питання керування процесом у реальному часі на основі вимірювання електропровідності, температури та інших параметрів, що дозволяє оптимізувати режими обробки для різних типів продукції.

Серед цікавих особливостей омічного нагрівання треба відзначити, що у деяких випадках електричне поле може впливати не лише на теплові, але і на структурні властивості матеріалу, сприяючи, наприклад, руйнуванню клітинних мембран або зміні реологічних характеристик. Це відкриває додаткові можливості для інтенсифікації технологічних процесів. Водночас важливим є контроль електричних параметрів, оскільки нерівномірність електропровідності може призводити до локальних перегрівів і зниження якості продукції.

Отже, ОН є ефективним, керованим і перспективним електрофізичним методом обробки продукції, який забезпечує високий рівень енергоефективності, рівномірність теплонадходження та можливість інтеграції з іншими сучасними технологіями обробки в агропромисловому комплексі.

Електропорація є одним із ключових електрофізичних явищ, що лежить в основі дії імпульсних електричних полів на біологічні об'єкти, і широко використовується як самостійний метод обробки продукції та біоматеріалів. Суть процесу полягає у зміні проникності клітинних мембран під дією

зовнішнього електричного поля, що призводить до формування в них нанорозмірних або мікророзмірних пор. Ці пори виникають внаслідок перерозподілу зарядів у ліпідному бішарі мембрани та досягнення критичного значення трансмембранної різниці потенціалів.

У природному стані клітинна мембрана виконує функцію селективного бар'єра, який регулює транспорт іонів, молекул та макромолекул. Під впливом електричного поля відбувається індукція додаткового електричного потенціалу на мембрані, який накладається на власний мембранний потенціал клітини. Якщо сумарний потенціал перевищує критичний рівень (близько 0,5–1 В), структура ліпідного шару дестабілізується, і в ньому утворюються гідрофільні канали. Це явище і називається електропорацією.

Електропорація може мати оборотний або необоротний характер. При оборотній електропорації пори є тимчасовими і зникають після припинення дії електричного поля, відновлюючи цілісність мембрани. Такий режим використовується для контрольованого введення речовин у клітини або інтенсифікації масопереносу. У випадку необоротної електропорації пошкодження мембрани є критичним і призводить до загибелі клітини, що використовується для знезараження або руйнування клітинних структур.

У технологіях переробки сільськогосподарської продукції електропорація застосовується як засіб інтенсифікації екстракційних процесів. Руйнування клітинних оболонок сприяє виходу внутрішньоклітинних компонентів, таких як соки, цукри, пігменти, біологічно активні речовини. Це дозволяє підвищити вихід продукту та зменшити енерговитрати на подальші стадії обробки, зокрема сушіння або пресування.

Особливістю електропорації є те, що вона поєднує електричні та біофізичні механізми впливу. Окрім безпосереднього формування пор, електричне поле може викликати електромеханічні напруження в клітинній оболонці, змінювати структуру білків і впливати на внутрішньоклітинні процеси. При цьому, на відміну від термічних методів, електропорація дозволяє досягати необхідного технологічного ефекту без значного підвищення температури, що є критично важливим для збереження якості продукції.

З інженерної точки зору реалізація електропорації здійснюється за допомогою установок імпульсних електричних полів, які формують короткі високовольтні імпульси. Основними параметрами, що визначають ефективність процесу, є напруженість електричного поля, тривалість імпульсу, частота повторення імпульсів та загальна енергія, підведена до продукту. Геометрія електродів і рівномірність електричного поля також мають суттєвий вплив на результат обробки.

Сучасні дослідження у сфері електропорації спрямовані на уточнення механізмів формування пор, моделювання процесів у клітинних структурах та оптимізацію режимів обробки для різних типів продукції. Значна увага приділяється використанню наносекундних імпульсів, які здатні впливати не лише на мембрану, але й на внутрішньоклітинні органели, що відкриває нові можливості у біотехнологіях.

Перспективним напрямком є поєднання електропорації з іншими методами обробки, такими як ультразвук, холодна плазма або електрохімічні процеси. Такі комбіновані технології дозволяють досягати синергетичного ефекту, зменшувати інтенсивність окремих впливів і підвищувати загальну ефективність процесу.

Цікавим є той факт, що електропорація широко використовується не лише у харчовій промисловості, але й у медицині та біоінженерії, зокрема для доставки лікарських препаратів у клітини та генетичної трансформації. Це підкреслює універсальність даного явища і його значний потенціал для подальшого розвитку.

Отже, електропорація є фундаментальним електрофізичним механізмом, який забезпечує ефективний і контрольований вплив на клітинні структури, відкриваючи широкі можливості для інтенсифікації технологічних процесів у сільському господарстві та суміжних галузях.

7.2 Електрофізичні властивості сільськогосподарської продукції

Електрофізичні властивості сільськогосподарської продукції визначають її поведінку під дією електричних полів і струмів та є важливими для

обґрунтування параметрів електрофізичної обробки. До основних властивостей належать електропровідність, діелектрична проникність, електрична міцність та поляризаційні характеристики.

Електропровідність продукції залежить від її вологості, температури, хімічного складу та структури тканин. Продукція з високим вмістом вологи має більшу електропровідність, що сприяє ефективнішому проходженню електричного струму та підвищенню інтенсивності електрофізичного впливу. Діелектрична проникність характеризує здатність матеріалу накопичувати електричну енергію в електричному полі і відіграє важливу роль у процесах високочастотного нагрівання.

Таблиця 7.1 – Впливи на електрофізичні властивості продуктів

Властивість	Вплив
Електропровідність	визначає струм
Діелектрична проникність	впливає на ВЧ-нагрів
Поляризація	важлива для PEF
Вологість	ключовий параметр

Знання електрофізичних властивостей дозволяє оптимізувати параметри електрофізичних установок, забезпечити ефективний вплив на продукцію та запобігти її пошкодженню. Це є основою для розробки сучасних технологій обробки сільськогосподарської продукції з використанням електричних і електромагнітних полів.

Електрофізичні властивості продукції визначають ефективність сучасних технологій. Взаємозв'язок електрофізичних властивостей продуктів виявляється у певних впливах, поданих у табл. 7.1.

👉 Нові дослідження пов'язані з:

- визначенням впливу зміни електричних властивостей для **діагностики якості продукції**;

- використання **комбінованих методів**, що поєднують використання ультразвуку та електрополя.

У США активно досліджуються електродинамічні системи, що використовують ШІ для визначення якості продукції за електричними параметрами.

Установки, вже реалізовані на практиці:

- електросепаратори зерна;
- установки електростимуляції насіння;
- системи діелектричного сортування.

Контрольні запитання до теми 7

1. Що таке електрофізичні методи обробки продукції?
2. Які види електрофізичних установок застосовуються в аграрному виробництві?
3. Які переваги електрофізичної обробки порівняно з тепловими методами?
4. Які електрофізичні властивості мають сільськогосподарські матеріали?
5. Як вологість продукції впливає на її електропровідність?
6. Яке значення має діелектрична проникність у технологічних процесах?
7. Як електрофізичні методи впливають на якість і збереження продукції?
8. Які сучасні напрями розвитку електрофізичних технологій у рослинництві?
9. У чому полягають особливості імпульсних електричних полів?
10. Які фактори необхідно враховувати при виборі параметрів електрофізичної обробки?
11. Що таке електропорація і де вона застосовується?
12. Які переваги холодної плазми?
13. Як електрофізичні методи впливають на структуру клітин?

Тема 8. ЕЛЕКТРОІСКРОВІ ТА ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНІ УСТАНОВКИ

8.1 Електроіскрові установки

Електроіскрові установки (ЕІУ) являють собою клас електротехнологічного обладнання, в якому обробка матеріалів здійснюється за рахунок серії керованих імпульсних електричних розрядів між електродом-інструментом і оброблюваною заготовкою. Ці процеси об'єднуються під загальною назвою *електроерозійної обробки* (англ. **EDM**) і належать до нетрадиційних методів обробки, що не базуються на механічному контакті інструмента з матеріалом.

Фізична суть електроіскрової обробки полягає у виникненні імпульсного пробоя міжелектродного проміжку, який заповнений діелектричною рідиною (як правило трансформаторним мастилом, гасом або спеціальними синтетичними рідинами). Під дією прикладеної напруги у зазорі формується електричне поле, напруженість якого досягає критичного значення, після чого відбувається електричний пробій і утворюється плазмовий канал. У цьому каналі густина струму може досягати значень 10^4 – 10^6 А/см², що призводить до миттєвого локального нагрівання матеріалу до температур понад 10000 К. У результаті такого впливу відбувається:

- плавлення мікрооб'ємів матеріалу;
- часткове випаровування;
- утворення кратерів на поверхні деталі;
- видалення продуктів ерозії потоком діелектричної рідини.

Кожен імпульс формує мікрократер, а сукупність імпульсів забезпечує поступове формування необхідної геометрії деталі. Отже, електроіскрова обробка є дискретним процесом з високою локалізацією теплового впливу.

Важливими параметрами процесу є:

- енергія імпульсу;
- тривалість імпульсу (як правило 1–1000 мкс);
- частота імпульсів;
- напруга та струм розряду;

- величина міжелектродного зазору.

Зміна цих параметрів дозволяє регулювати продуктивність обробки, шорсткість поверхні та точність виготовлення.

З технологічної точки зору електроіскрові установки поділяються на:

- прошивні (англ. die-sinking EDM);
- дротові (англ. wire EDM);
- мікро-EDM;
- установки електроіскрового легування.

Прошивні установки використовуються для формування складних внутрішніх порожнин, наприклад у штампах або прес-формах. Дротові установки застосовуються для різання складних контурів за допомогою тонкого дроту-електрода, який переміщується за програмою числового керування.

Особливе місце займає **електроіскрове легування**, при якому матеріал електрода переноситься на поверхню деталі під дією імпульсних розрядів. Це дозволяє формувати зносостійкі, корозійностійкі або жаростійкі покриття. У сільськогосподарському машинобудуванні така технологія застосовується для зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки, ножів кормозбиральних машин, елементів транспортерів тощо.

Електроіскрові установки належать до високотехнологічних засобів обробки матеріалів, у яких використовується енергія імпульсних електричних розрядів для локального руйнування матеріалу. Основою процесу є електричний пробій міжелектродного зазору, заповненого діелектриком, що призводить до формування плазмового каналу та інтенсивного теплового впливу на поверхню деталі.

У класичних установках типу **die-sinking EDM (прошивні установки)** електрод-інструмент має форму, обернену до форми майбутньої порожнини. Під час імпульсної обробки електрод поступово занурюється у матеріал, формуючи складні тривимірні поверхні. Перевагою таких установок є висока точність (до кількох мікронів) та можливість обробки надтвердих матеріалів (карбіди, загартовані сталі). Недоліком є відносно низька продуктивність і підвищене зношування електрода.

Дротові електроіскрові установки (wire EDM) використовують тонкий металевий дріт (як правило латунний або молібденовий), який безперервно подається через зону обробки. Такі установки забезпечують високу точність різання складних контурів і широко застосовуються при виготовленні штампів, прес-форм та деталей складної конфігурації. Їх перевагою є відсутність необхідності виготовлення складного інструмента, однак обмеженням є можливість обробки лише наскрізних контурів.

Мікро-EDM установки є розвитком електроіскрових технологій для обробки мікроелементів і мікроструктур. Вони працюють з надмалими енергіями імпульсів і дозволяють формувати елементи розміром у десятки мікрометрів. Такі установки використовуються у мікромеханіці, біомедичних пристроях та точному машинобудуванні.

👉 Сучасні **дослідження** спрямовані на використання ультракоротких імпульсів (нано- та пікосекундних), що дозволяє зменшити зону термічного впливу.

Окремим напрямом є **електроіскрове легування (англ. ESL)**. У таких установках електрод виготовляється з матеріалу, який необхідно перенести на поверхню деталі. Під дією імпульсів відбувається перенесення матеріалу електрода з утворенням зміцненого шару товщиною від кількох мікрон до сотень мікрон. Перевагами є висока адгезія покриття та можливість локального зміцнення. Недоліком є обмежена рівномірність шару та необхідність точного контролю режимів.

👉 У сучасних умовах активно **досліджуються** і розвиваються **гібридні електроіскрові установки**, що поєднують EDM із:

- лазерною обробкою;
- ультразвуковими коливаннями;
- електрохімічними процесами.

Такі системи дозволяють підвищити продуктивність і зменшити зношування електродів. Наприклад, у Німеччині (компанія Fraunhofer IPT)

досліджуються установки, де ультразвук покращує видалення продуктів ерозії, що підвищує стабільність процесу.

Сучасні дослідження у галузі EDM спрямовані на:

- використання *ультракоротких імпульсів (нано- та пікосекундних)*;
- застосування *адаптивного керування процесом*;
- створення *гібридних EDM-лазерних установок*;
- використання *екологічно безпечних діелектриків*.

У провідних європейських компаніях (наприклад, GF Machining Solutions, Sodick) впроваджуються системи, які в реальному часі аналізують параметри розряду та автоматично оптимізують режим обробки. Це дозволяє зменшити зношування електродів і підвищити точність до рівня мікронів.

Електроіскрові установки **застосовуються** для:

- відновлення зношених поверхонь деталей;
- виготовлення складних форм і каналів;
- різання та прошивання отворів у твердих сплавах;
- зміцнення поверхні методом електроіскрового легування.

👉 Цікавим напрямом досліджень є електроіскрове легування (ESL), яке дозволяє наносити на поверхню деталі тонкі зміцнюючі шари з карбідів або нітридів. У сільськогосподарській техніці це застосовується для відновлення плугів, ножів, робочих органів ґрунтообробних машин.

Сучасні тенденції:

- використання *наноструктурованих електродів*;
- застосування *мікро-EDM* для високоточної обробки;
- *інтеграція з ЧПУ та роботизованими системами*.

У ЄС (Швейцарія, компанія GF Machining Solutions) активно розвиваються установки EDM з адаптивним керуванням, що автоматично змінюють параметри імпульсів для оптимізації процесу.

👉 **Цікавий факт:** у сучасних EDM-системах використовується штучний інтелект для аналізу сигналів розряду та оптимізації параметрів у реальному часі, що дозволяє зменшити шорсткість поверхні до $Ra < 0,2$ мкм.

8.2 Електроімпульсні установки

Електроімпульсні установки являють собою клас електротехнологічного обладнання, в якому використовується енергія короткочасних імпульсів високої напруги та струму. Принцип їх дії базується на накопиченні енергії у конденсаторних батареях або індуктивних накопичувачах з подальшим її швидким вивільненням у навантаження.

Основними *складовими електроімпульсної установки* є:

- джерело живлення;
- накопичувач енергії (конденсатор);
- комутуючий пристрій (іскровий розрядник або тиристор);
- робоча камера;
- система керування.

Під час розряду накопичена енергія вивільняється за дуже короткий час (від наносекунд до мілісекунд), що призводить до виникнення потужних електричних, теплових і механічних ефектів. Залежно від параметрів імпульсу можливі різні режими впливу:

- електричний пробій;
- електромеханічний удар;
- плазмоутворення;
- електропорація клітин.

Електроімпульсні установки базуються на використанні короткочасних імпульсів високої напруги, що генеруються накопичувачами енергії (конденсаторами або індуктивностями). Вивільнення енергії відбувається за дуже короткий час, що призводить до виникнення інтенсивних електричних, теплових і механічних ефектів.

Одним із найбільш поширених типів є *конденсаторні імпульсні установки*, у яких енергія накопичується у батареї конденсаторів і розряджається через навантаження. Такі установки застосовуються у:

- зварюванні;
- формуванні металів;

- електроімпульсному дробленні.

Їх перевагою є можливість отримання дуже високих пікових потужностей, однак недоліком – складність керування імпульсами та електромагнітні завади.

В аграрному секторі поширення набули установки з пульсуючими електричними полями (англ. PEF). У них продукт пропускається між електродами, до яких прикладаються короткі імпульси напруги (10–50 кВ/см). У результаті виникає електропорація клітинних мембран. Це дозволяє:

- підвищити вихід соку (на 10–25 %);
- прискорити сушіння;
- покращити екстракцію біоактивних речовин.

Недоліком PEF є необхідність точного контролю параметрів поля, оскільки надмірна напруга може призвести до руйнування тканин.

Електроімпульсні установки дроблення працюють за принципом створення імпульсних напружень у матеріалі. Розряд відбувається всередині або поблизу матеріалу, що призводить до його руйнування по слабких місцях (межах зерен), що дозволяє:

- зменшити енерговитрати;
- отримати більш рівномірний гранулометричний склад;
- зменшити зношування обладнання.

👉 Сучасні дослідження включають **наносекундні імпульси** (англ. **nsPEF**), які використовуються у біотехнологіях. Вони здатні впливати на внутрішньоклітинні структури без руйнування клітинної оболонки. Це відкриває перспективи для:

- стерилізації без нагрівання;
- стимуляції росту рослин;
- біомедичних застосувань.

Одним із найбільш перспективних напрямів є **обробка імпульсними електричними полями** (англ. **PEF**). Ця технологія широко застосовується у харчовій промисловості та аграрному секторі для:

- підвищення виходу соку;
- інтенсифікації сушіння;
- знезараження продуктів;
- стимуляції росту рослин.

Фізична основа PEF-технології полягає у виникненні електропорації – утворенні мікроскопічних пор у клітинних мембранах під дією сильного електричного поля (10–50 кВ/см). Це призводить до зміни проникності клітин і значного прискорення масообмінних процесів.

 **Цікавий факт:** застосування PEF дозволяє знизити енерговитрати при сушінні сільськогосподарської продукції до 25–40 %.

Іншим важливим напрямом є *електроімпульсне дроблення матеріалів*, яке базується на виникненні імпульсних напружень у структурі матеріалу. Такий метод дозволяє:

- руйнувати матеріали по межах зерен;
- зменшувати пиловиділення;
- підвищувати ефективність подрібнення.

 Сучасні дослідження у напрямі застосування електроімпульсного дроблення матеріалів спрямовані на використання:

- наносекундних імпульсів для біотехнологій;
- імпульсної стерилізації;
- обробки води та ґрунтів;
- імпульсів у точному землеробстві.

У США та ЄС активно розробляються PEF установки для:

- обробки насіння імпульсними полями;
- стимуляції росту рослин;
- зниження використання хімічних препаратів.

 **Цікавий факт:** електроімпульсні технології дозволяють зменшити енерговитрати на дроблення матеріалів до 30–50 % порівняно з механічними методами.

 Сучасні дослідження:

- **наносекундні імпульси** (англ. **nsPEF**) – для біотехнологій;
- установки для **обробки насіння імпульсним струмом**;
- системи **очищення води** від органічних забруднень.

У США (USDA, MIT) досліджуються установки імпульсного впливу для підвищення схожості насіння та прискорення росту рослин.

Контрольні запитання до теми 8

1. У чому полягає фізична суть електроіскрової обробки?
2. Які параметри визначають ефективність електроіскрових процесів?
3. Що таке електроіскрове легування і де воно застосовується?
4. Який принцип дії електроімпульсних установок?
5. Які переваги електроімпульсного дроблення матеріалів?
6. Які сучасні напрями розвитку EDM-технологій?
7. Які галузі застосування електроімпульсних установок у сільському господарстві?
8. Як впливає форма імпульсу на процес обробки?
9. Які типи накопичувачів енергії використовуються в імпульсних установках?
10. Які перспективи використання наносекундних імпульсів?

Тема 9. ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНІ УСТАНОВКИ

9.1 Електрогідравлічні установки

Електрогідравлічні установки є складними електротехнічними системами, що реалізують перетворення електричної енергії у механічну через розряд у рідкому середовищі, що призводить до виникнення ударних хвиль, кавітаційних явищ та локальних високих тисків. Даний ефект використовується для обробки матеріалів, очищення, змішування та руйнування структур. Основним робочим середовищем є вода, яка виконує роль діелектрика та передавача ударних хвиль.

Основними *елементами* установки є:

- джерело імпульсної енергії;
- електроди;
- робоча камера з рідиною;
- система керування.

Під час розряду у воді виникає плазмовий канал, що супроводжується миттєвим розширенням і формуванням ударної хвилі з тиском до сотень МПа.

Сфери застосування електрогідравлічних установок:

- очищення обладнання;
- подрібнення матеріалів;
- обробка води;
- стимуляція росту рослин.

Електрогідравлічний ефект включає комплекс взаємопов'язаних **процесів**:

1. електричний пробій рідини;
2. формування плазмового каналу;
3. різке підвищення температури (до 20000 K);
4. вибухоподібне розширення каналу;
5. утворення ударної хвилі;
6. кавітація.

Ударна хвиля створює тиск до сотень мегапаскалів, що забезпечує ефективне руйнування матеріалів. Кавітаційні процеси додатково підсилюють ефект за рахунок схлопування бульбашок.

👉 **Цікавий факт:** ефективність електрогідравлічного впливу може перевищувати традиційні механічні методи у 2–3 рази.

9.2 Фізична природа електрогідравлічного ефекту

Електрогідравлічний ефект виникає внаслідок швидкого виділення енергії електричного розряду у рідині. Процес включає такі складові:

1. пробій рідини;
2. формування плазмового каналу;
3. різке зростання тиску;
4. утворення ударної хвилі;
5. кавітаційні процеси.

Вплив електрогідравлічного ефекту призводить до:

- руйнування матеріалів;
- диспергування частинок;
- інтенсифікації масообміну.

Електрогідравлічний ефект є результатом комплексної взаємодії електричних, теплових і гідродинамічних процесів. Після пробію рідини формується плазмовий канал, температура якого може досягати 20000 К. Це викликає миттєве випаровування рідини та утворення газопарової порожнини.

Подальше розширення цієї порожнини створює ударну хвилю з дуже високим тиском. Після цього відбувається її схлопування, що супроводжується кавітаційними явищами.

Переваги використання електрогідравлічного ефекту:

- висока енергоємність процесу;
- відсутність механічного контакту;
- екологічна безпечність.

Недоліки використання електрогідравлічного ефекту:

- складність обладнання;
- високі вимоги до ізоляції;
- ерозія електродів.

👉 **Цікавий факт:** тиск у зоні розряду може досягати **1000 МПа**, що співставно з вибуховими процесами, але без використання вибухових речовин.

👉 Сучасні дослідження використання електрогідрравлічного ефекту:

- використання імпульсних розрядів для **очищення стічних вод**
- обробка харчових продуктів
- екстракція біоактивних речовин

9.3 Область застосування електрогідрравлічних установок

Електрогідрравлічні установки знаходять застосування у різних галузях:

У сільському господарстві:

- обробка насіння;
- очищення води;
- знезараження середовищ;
- подрібнення кормів.

У промисловості:

- очищення поверхонь;
- руйнування твердих матеріалів;
- очищення трубопроводів.

Перспективні **напрямки використання** електрогідрравлічних установок:

- **water treatment (EC)** – видалення мікропластика з води у водоймах;
- **green extraction technologies** – екологічно безпечні технології екстракції речовин;
- використання комбінованих систем, що поєднують електрогідрравлічні і ультразвукові установки.

👉 У Німеччині та Нідерландах **досліджуються** установки для очищення води від фармацевтичних залишків.

У ЕС активно впроваджуються:

- установки для очищення стічних вод без реагентів;
- комбіновані системи, що поєднують електрогідравлічні, плазмої і ультразвукові технології.

👉 **Цікавий факт:** електрогідравлічні установки здатні замінювати вибухові методи руйнування, але без їх небезпеки.

Контрольні запитання до теми 9

1. Що таке електрогідравлічний ефект?
2. Які фізичні процеси відбуваються під час розряду у воді?
3. Які параметри визначають ефективність процесу?
4. Які області застосування електрогідравлічних установок?
5. Які переваги цього методу порівняно з механічними?
6. Які сучасні напрями досліджень?
7. Як виникають кавітаційні явища?
8. Які конструктивні елементи входять до складу установки?
9. Як впливає напруга на процес розряду?
10. Які екологічні переваги електрогідравлічних технологій?

Тема 10. УЛЬТРАЗВУКОВІ УСТАНОВКИ

10.1 Фізичні основи ультразвуку

Ультразвук – це пружні механічні хвилі з частотою понад 20 кГц, що поширюються в газах, рідинах і твердих тілах. У технологіях використовують широкий діапазон частот: від десятків кілогерц (силовий ультразвук) до десятків мегагерц (діагностичний та високочастотний вплив). Генерація ультразвуку здійснюється електроакустичними перетворювачами – переважно п'єзoeлектричними та магнітострикційними.

П'єзoeлектричні перетворювачі (англ. *PZT*, *квари*) працюють за рахунок прямого п'єзoeфекту: змінна напруга викликає періодичні деформації кераміки, що генерують хвилі заданої частоти. Вони забезпечують високий ККД (до 90–95%), точну настройку частоти (резонансні режими), компактність і придатність до інтеграції в автоматизовані лінії. Недоліки – деградація властивостей при перегріві та чутливість до ударних навантажень.

Магнітострикційні перетворювачі базуються на зміні розмірів феромагнетиків у змінному магнітному полі. Вони витриваліші в агресивних середовищах (висока температура, волога), але мають нижчий ККД і більші габарити. Використовуються в промислових ваннах очищення, де важлива механічна надійність.

Ключовим нелінійним ефектом є **кавітація**. У фазі розрідження тиску в рідині утворюються мікробульбашки, які при подальшому стисканні схлопуються. Під час схлопування формуються локальні “гарячі точки” ($T \approx 4000\text{--}5000\text{ К}$, $p \approx 100\text{--}1000\text{ МПа}$) і мікрострумені зі швидкостями десятки–сотні м/с. Це забезпечує інтенсивну ерозію забруднень, руйнування клітинних структур і прискорення масопереносу.

Режими роботи:

- 20–40 кГц – інтенсивна кавітація (очищення, екстракція, дезінтеграція);
- 40–100 кГц – делікатніший вплив (харчова обробка, гомогенізація);
- 0,5–5 МГц – діагностика, контроль якості, мінімальний руйнівний вплив.

👉 **Цікавий факт:** кавітація є причиною зносу гребних гвинтів суден, що підкреслює її руйнівний потенціал і необхідність оптимізації параметрів у технологічних установках.

👉 **Сучасні дослідження:**

- **сонореактори** з керованими стоячими хвилями для рівномірного поля кавітації;
- **широкосмугові генератори**, що «сканують» частоту для уникнення «мертвих зон»;
- **мультичастотні системи** (наприклад, 20 + 40 + 80 кГц), які комбінують режими для підвищення ефективності.

10.2 Застосування ультразвуку в технологічних процесах

1) Ультразвукові ванни очищення

Застосовують акустичну кавітацію для інтенсивного видалення забруднень із поверхонь шляхом мікроструменів і ударних імпульсів, що руйнують адгезійні зв'язки між частинками та матеріалом.

Принцип дії: кавітація відриває забруднення з поверхні деталей і з важкодоступних місць (мікропори, різьби).

Переваги застосування ультразвуку: безконтактність, відсутність абразивного зносу, можливість очищення складної геометрії.

Недоліки застосування ультразвуку: обмежена ефективність для великих масивних виробів, потреба у правильному підборі рідини (детергент).

Приклад застосування ультразвуку: промислові установки **Elma, Branson**, які використовуються для миття доїльного обладнання та форсунок.

👉 **Сучасні дослідження:** поєднання ультразвуку з **електрохімічним очищенням** (поєднання ЕС і US) для прискорення видалення оксидів.

2) Ультразвукове сушіння (англ. US)

Забезпечує інтенсифікацію масопереносу вологи за рахунок кавітаційних і акустичних ефектів, що зменшують дифузійні опори та прискорюють видалення вологи з матеріалу.

Принцип дії: ультразвук знижує опір масопереносу, викликає мікропомпи в порах і прискорює вихід вологи.

Переваги застосування ультразвукового сушіння: зменшення температури сушіння, збереження вітамінів і структури продукту.

Недоліки застосування ультразвукового сушіння: складність масштабування, потреба у синхронізації з повітряними потоками.

Результати застосування ультразвукового сушіння: у дослідженнях (Іспанія, Нідерланди) – скорочення часу сушіння фруктів на 20–40 % та зменшення теплонадходжень.

3) Ультразвукова екстракція (англ. UAE)

Базується на руйнуванні клітинних структур і підвищенні проникності тканин під дією кавітації, що значно підсилює вихід цільових компонентів у розчинник.

Принцип дії: кавітація руйнує клітинні стінки, підвищуючи дифузію розчинених речовин.

Переваги застосування ультразвукової екстракції: висока швидкість, низькі температури, підвищений вихід (олії, поліфеноли).

Недоліки застосування ультразвукової екстракції: можливе окиснення при надмірній інтенсивності, необхідність оптимізації режимів.

Приклад застосування ультразвукової екстракції: установки ***Hielscher Ultrasonics*** для екстракції різних речовин з рослин.

Перспективи застосування ультразвукової екстракції: ***поєднання з екологічно безпечною хімічними речовинами***, використання води як розчинника.

4) Ультразвукова гомогенізація і емульгування

Реалізує диспергування фаз до мікро- і нанорівня за рахунок інтенсивних локальних зсувних напружень і кавітаційних ефектів, забезпечуючи стабільні емульсії.

Принцип дії: кавітаційні мікрострумені дроблять краплі до субмікронних розмірів.

Переваги застосування ультразвукової гомогенізації і емульгування: стабільні емульсії без емульгаторів або з їх зменшенням.

Недоліки застосування ультразвукової гомогенізації і емульгування: енерговитрати, локальне нагрівання.

Застосування застосування ультразвукової гомогенізації і емульгування: кормові емульсії, молочні продукти, біодобавки.

5) Ультразвукова дезінфекція води

Здійснюється шляхом механічного та хімічного впливу кавітації, що призводить до руйнування клітинних структур мікроорганізмів і утворення активних радикалів.

Принцип дії: кавітація та радикали ($\text{OH}^\cdot$) руйнують клітинні мембрани мікроорганізмів.

Переваги застосування ультразвукової дезінфекції води: відсутність хімічних реагентів.

Недоліки застосування ультразвукової дезінфекції вод: обмежена ефективність для спор і вірусів без комбінування.

Сучасні рішення: використання гібридних систем водоочищення (у країнах ЄС), що поєднують ультразвукове сушіння US, ультрафіолетове випромінювання UV та озонування.

6) Ультразвукові проточні реактори

Забезпечують безперервну інтенсифікацію фізико-хімічних процесів у потоці за рахунок контрольованого ультразвукового впливу та ефективного перемішування середовища.

Принцип дії: обробка потоку рідини у каналі з ультразвуковими випромінювачами.

Переваги використання ультразвукових проточних реакторів: масштабованість, інтеграція в лінії.

Недоліки ультразвукових проточних реакторів: складність забезпечення рівномірності поля.

👉 **Дослідження:** Дослідження у сфері *безперервної проточної сонохімії* (англ. CFS) для переробки аграрної сировини є одним із сучасних напрямків інтенсифікації технологічних процесів, що базуються на використанні ультразвукових коливань у проточних системах. На відміну від традиційних періодичних процесів, де обробка здійснюється у замкненому об'ємі, проточні сонохімічні установки забезпечують безперервний рух сировини через зону ультразвукового впливу, що суттєво підвищує продуктивність, керованість та можливість інтеграції у промислові технологічні лінії.

Фізична основа сонохімічних процесів пов'язана з явищем акустичної кавітації, яке виникає під дією ультразвукових хвиль у рідкому середовищі. При проходженні ультразвуку утворюються та колапсують мікроскопічні бульбашки, що супроводжується локальними екстремальними умовами – високими температурами, тисками та швидкісними мікропотоками. У проточних системах ці ефекти реалізуються у динамічному режимі, коли оброблюване середовище постійно оновлюється, що запобігає локальному перенасиченню продуктами реакції та забезпечує стабільність процесу.

Для аграрної сировини, яка як правило має складну гетерогенну структуру (клітинні тканини, волокна, дисперсні частинки), *безперервна сонохімічна обробка CFS дозволяє ефективно руйнувати клітинні стінки, підвищувати проникність тканин і, як наслідок, інтенсифікувати процеси екстракції*. Це особливо важливо при отриманні соків, рослинних екстрактів, ефірних олій, поліфенолів та інших біологічно активних речовин. У проточному режимі досягається більш рівномірний вплив ультразвуку на весь об'єм продукту, що зменшує нерівномірність обробки, характерну для періодичних установок.

Інженерна реалізація CFS передбачає використання спеціалізованих реакторів, у яких ультразвукові перетворювачі (п'єзоелектричні або магнітострикційні) інтегруються безпосередньо в проточний канал. Конструкція таких реакторів оптимізується з урахуванням розподілу акустичного поля, гідродинаміки потоку та характеристик сировини. Важливими параметрами є частота ультразвуку (як правило 20–40 кГц для інтенсивної кавітації), густина

потужності, швидкість потоку та тривалість перебування продукту у зоні обробки.

Однією з **ключових переваг** безперервної сонохімії є можливість точного керування технологічним процесом. Зміна швидкості потоку або потужності ультразвуку дозволяє регулювати ступінь обробки без зупинки виробництва. Крім того, такі системи легко інтегруються з іншими технологічними операціями, наприклад, із фільтрацією, сепарацією або термічною обробкою, що відкриває можливості для створення комплексних енергоефективних ліній переробки.

Сучасні дослідження у цій галузі спрямовані на підвищення енергоефективності та масштабованості процесів. Однією з проблем є нерівномірний розподіл кавітаційної активності в об'ємі реактора, що може призводити до зон з недостатньою інтенсивністю обробки. Для її вирішення розробляються багаточастотні ультразвукові системи, багатопозиційні перетворювачі та реактори зі складною геометрією, які забезпечують більш рівномірний розподіл акустичного поля.

Перспективним напрямком є поєднання CFS з іншими методами електрофізичної обробки, зокрема з імпульсними електричними полями, холодною плазмою та електрохімічними процесами. Такі гібридні технології дозволяють досягати синергетичного ефекту: ультразвук підвищує проникність клітинних структур і покращує масоперенос, тоді як інші методи забезпечують додатковий вплив на хімічні або біологічні процеси.

Цікавим аспектом є те, що безперервна сонохімія дозволяє значно скоротити час обробки порівняно з традиційними методами, а також зменшити використання хімічних реагентів. У деяких випадках це дозволяє перейти до більш екологічно чистих технологій, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку. Крім того, ультразвукова обробка може впливати на структуру продукту на мікрорівні, покращуючи його функціональні властивості, наприклад, розчинність або біодоступність компонентів.

Отже, CFS є перспективним напрямком розвитку електрофізичних методів обробки аграрної сировини, який поєднує високу інтенсивність процесів,

можливість масштабування та інтеграції у сучасні технологічні системи. Його подальший розвиток пов'язаний із вдосконаленням конструкцій реакторів, оптимізацією режимів роботи та розширенням сфер практичного застосування.

7) Ультразвук у точному землеробстві

Ультразвук у системах точного землеробства застосовується для високоточного дистанційного вимірювання геометричних параметрів агрооб'єктів (висоти рослин, профілю ґрунту, рівня рідин) та реалізації сенсорних підсистем автоматизованого керування технологічними операціями. Використання ультразвукових сенсорів забезпечує оперативний моніторинг стану посівів і оптимізацію внесення ресурсів у режимі реального часу з урахуванням просторової неоднорідності поля.

Ідея використання ультразвуку: локальна обробка насіння та розчинів, стимуляція ферментативної активності рослин.

Приклад застосування: мобільні установки для передпосівної обробки насіння.

Перспектива застосування ультразвуку у точному землеробстві: інтеграція з IoT для адаптивного керування параметрами.

10.3 Дія ультразвуку на біологічні об'єкти

Дія ультразвуку на біологічні об'єкти зумовлена кавітаційними, механічними та фізико-хімічними ефектами, що призводять до зміни проникності клітинних мембран, інтенсифікації масопереносу та можливого руйнування клітинних структур. У технологічних процесах це використовується для керованого впливу на мікроорганізми і тканини з метою інтенсифікації обробки, знезараження та модифікації властивостей біоматеріалів.

Механічна дія ультразвуку: мікрострумені та градієнти тиску деформують клітини, підвищують проникність мембран (аналог «м'якої» електропорації). Це стимулює обмін речовин і активність ферментів.

Теплова дія ультразвуку: при високих інтенсивностях можливе локальне нагрівання, але в оптимальних режимах температура контролюється.

Хімічна дія (соноліз) ультразвуку полягає в утворенні активних радикалів (OH^- , H^+), які окиснюють органічні забруднення та інактивують мікроорганізми.

Застосування ультразвуку для впливу на біологічні об'єкти:

- стимуляція проростання насіння (зростання схожості на 5–15 %);
- знезараження поверхні зерна;
- обробка кормів (підвищення засвоюваності).

Ризики використання ультразвуку як впливу на біологічні об'єкти: надмірна інтенсивність призводить до руйнування тканин, деградації біоактивних сполук.

👉 Сучасні дослідження сфери використання ультразвуку як впливу на біологічні об'єкти:

- комбінування з PEF (ультразвук + імпульсні поля) для синергічного ефекту (підсилення);
- вплив на мікробіом організму і його ДНК (контрольовані низькоінтенсивні режими);
- **сонокаталіз** (комбінація ультразвуку і каталізаторів хімічних процесів) для очищення води.

Контрольні запитання до теми 10

1. Фізична природа ультразвуку та режими його застосування.
2. Принцип роботи п'єзоелектричних і магнітострикційних перетворювачів.
3. Механізм кавітації та її роль у технологіях.
4. Переваги і недоліки ультразвукового очищення.
5. Інтенсифікація сушіння під дією ультразвуку.
6. Принцип ультразвукової екстракції та її ефективність.
7. Дія ультразвуку на біологічні об'єкти.
8. Гібридні ультразвукові технології (US+UV, US+PEF).
9. Обмеження та ризики застосування.
10. Перспективи розвитку CFS у агросекторі.

Тема 11. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ

11.1 Фізико-хімічні процеси під дією струму

Електрохімічна обробка ґрунтується на тому, що електричний струм у середовищі з іонною провідністю (електроліті) примушує систему виконувати керовані окисно-відновні перетворення. На відміну від суто електротермічних методів, тут ключовим є не нагрів, а перенесення заряду та речовини: електрони течуть у зовнішньому колі, а іони – в електроліті. Критично важливими є електродні реакції (на межі «електрод–електроліт») і масоперенос (дифузія, міграція в електричному полі, конвекція).

Базовий процес – *електроліз*, тобто електрохімічне розкладання, тобто перетворення хімічних сполук під дією струму. На аноді як правило відбувається окиснення (віддача електронів), на катоді – відновлення (прийняття електронів). Водні системи майже завжди включають реакції з водою: на аноді може утворюватися кисень і високоактивні окисники, на катоді – водень та гідроксид-іони, що зсуває рН і змінює розчинність домішок. Це часто використовують технологічно: наприклад, локальне підлучення біля катода може спричиняти осадження гідроксидів металів, а локальне підкислення біля анода – для розчинення відкладень.

Окремий клас – *електрохімічні методи очищення: електрокоагуляція* (ЕС), *електроокиснення* (ЕО), *електрофлотація*, *електродіаліз*, *електродезінфекція*, *електрохімічні розширені окиснювальні процеси* (Е-АОР). У *електрокоагуляції* аноди з заліза або алюмінію розчиняються під струмом, утворюючи гідроксокомплекси, що коагулюють колоїди та емульсії і збирають забруднювачі у флокули. Цей підхід активно розглядають для вилучення агрохімікатів, зокрема пестицидів, із водних потоків.

У *електроокисненні* ключову роль відіграє матеріал анода. Сучасна тенденція – застосування так званих неактивних анодів, зокрема бор-легованого алмазу (BDD): на їх поверхні генеруються дуже реакційноздатні гідроксильні радикали $\text{OH}^\cdot$, здатні мінералізувати широкий спектр органічних домішок. Наукові огляди відзначають високу ефективність BDD-анодів для складних

речовин і підкреслюють розвиток компактних установок та підходів до роботи з низькопровідними розчинами.

Важлива фізико-хімічна деталь – перенапруга та поляризація електродів, які визначають енерговитрати та селективність. У реальних установках енергоефективність часто обмежуються не хімічними процесами, а сумарним електричним опором системи: опір електроліту, контактів, електродів, а також побічні реакції (наприклад, виділення газів). Тому сучасні дослідження концентруються на інженерії електродних матеріалів (каталіз, наноструктурування, створення покриттів), оптимізації гідродинаміки (для зменшення дифузійних обмежень) і керуванні імпульсними режимами струму, що дозволяє знижувати пасивацію електродів і підвищувати вихід за струмом.

Сучасні напрямки досліджень:

1) пропонуються **нові матеріали анодів** для технології E-AOP: алмази, леговані бором (BDD), змішані оксиди металів (MMO), розмірно стабільні аноди (DSA), композити з вуглецевими матеріалами – з метою одночасно підвищити стійкість і знизити їх вартість;

2) використовуються **гібридні процеси** – інтегровані технологічні схеми, в яких електрохімічні методи (електроліз, електроокиснення, електрокоагуляція) поєднуються з мембранними процесами (електродіаліз, нанофільтрація, зворотний осмос), фізичними методами інтенсифікації (ультразвукова кавітація, плазмохімічна активація) та біотехнологічними стадіями (аеробне та анаеробне очищення), що забезпечує синергетичний ефект підвищення ефективності масопереносу, швидкості реакцій і ступеня очищення;

3) поширюється сфера застосування **цифрового керування та моделювання**: досліджуються алгоритми оптимізації, у т. ч. машинного навчання, для підбору густини струму, рН, часу електролізу і складу електроліту (прикладом є сучасні роботи з моделюванням EO).

 **Цікаві факти.** Електрокоагуляція дозволяє створити коагулянт на місці з електрода, тому в багатьох схемах зменшується потреба у внесенні солей коагулянтів і, відповідно, у логістиці реагентів.

Аноди BDD розглядають як один із найефективніших класів для глибокого окиснення органіки, а інженерне завдання – здешевлення та масштабування без втрати ресурсу електрода.

11.2 Обробка сільськогосподарської продукції електричним струмом

У контексті електрохімічної обробки агропродукції «обробка струмом» найчастіше означає кероване електрохімічне формування активних агентів або електролітичні середовища, які потім контактують із продуктом чи поверхнями технологічного обладнання. Найпоширеніший приклад – *електролізована вода* (англ. EW), яку також описують як *електроактивована вода* (англ. EAW). Вона утворюється в електролізері з розділенням потоків через мембрану або діафрагму, або без неї, і характеризується контрольованими параметрами: рН, окисно-відновний потенціал (ORP), вміст активних форм хлору (за наявності хлорид-іонів), а також активних форм кисню, азоту залежно від схеми.

На практиці EW використовують як санітайзер (рідина для дезінфекції поверхонь) для фруктів, овочів, м'ясної та рибної сировини, тари, інвентарю та контактних поверхонь. Сучасні огляди підкреслюють переваги EW: відносно проста генерація рідини на місці, швидка дія, сумісність з потоковими мийними лініями, а також можливість комбінування з іншими технологіями без використання теплового впливу (ультразвук, високий тиск, холодна плазма тощо) для підсилення ефекту без погіршення якості продукту.

З інженерної точки зору EW-установка – це електрохімічний реактор, де ключовими є: матеріал електродів (часто титан з оксидними покриттями типу MMO), геометрія каналів, розподіл струму, а також керування складом вихідної води (наприклад, вмістом хлоридів Cl^-) і її властивостями (наприклад, провідністю). Для харчових технологій важливе узгодження режимів, щоб мінімізувати небажані побічні ефекти: зміни текстури, окиснення пігментів, корозійний вплив на обладнання. Саме тому сучасні роботи часто досліджують режими з помірними концентраціями активних агентів та комбіновані технології, що включають використання EW.

Перспективний напрям – масштабування EW/AEW для майже промислових технологічних ліній із контрольованими параметрами розчину у великих об’ємах (сотні літрів) та моніторингом фізико-хімічних параметрів (pH/ORP/вільного хлору в реальному часі). У науковій літературі можна знайти описи таких майже промислових експериментальних ліній. У паралельному напрямі EW розглядають як технологію, що потенційно зменшує використання традиційних хімічних дезінфектантів, якщо правильно налаштувати режими та контроль безпеки.

Сучасні напрямки досліджень

1) Інтегровані (гібридні) нетермічні технології санітарної обробки, що поєднують застосування електролізованої води (EW) як електрохімічно активованого антимікробного середовища з фізичними методами інтенсифікації – ультразвуковою кавітацією, обробкою під високим гідростатичним тиском (НРР) та холодною плазмою атмосферного тиску – з метою досягнення синергетичного знезаражувального ефекту при мінімальному впливі на структурно-механічні та органолептичні властивості продукції.

2) Кінетика і механізми впливу на біоплівки: електрохімічно активовані розчини часто досліджують саме щодо руйнування біоплівок на поверхнях технологічного обладнання, що актуально для молочної та м’ясної промисловості.

3) Онлайн-контроль та стандартизація параметрів: розвиток датчиків ORP, вільного хлору і моделей стабільності EW у часі оскільки активні компоненти можуть деградувати під дією світла і температури.

 **Цікаві факти.** У харчових оглядах використання EW часто розглядають не лише як спосіб дезінфекції, а також як інструмент керування якістю: вивчають вплив на текстуру та сенсорні властивості різних категорій продуктів і шукають компроміс між безпекою та органолептикою.

Перевага EW як технології – генерація на місці: не потрібно транспортувати та зберігати великі об’єми рідких дезінфектантів, але натомість зростає вимога до електрохімічної дисципліни (контроль води, електродів, параметрів процесу).

11.3 Електрохімічний захист від корозії

Електрохімічний захист – це сукупність методів, які змінюють електрохімічний стан металу так, щоб припинити або істотно сповільнити анодні реакції розчинення (корозію). Для об'єктів агропромислового призначення і переробних підприємств це особливо актуально: вода, добрива, гнійові стоки, електроліти, дезінфектанти та змінна вологість створюють агресивне середовище для трубопроводів, резервуарів, теплообмінників, металоконструкцій.

Найбільш поширені підходи: катодний захист (*англ.* CP) та анодний захист (рідше, для специфічних систем). Катодний захист реалізують двома базовими способами. Перший підхід побудований на застосуванні протекторного аноду (*англ.* SACP): до захищуваної конструкції під'єднують метал з більш негативним електрохімічним потенціалом (наприклад, цинк, магній, алюміній), який кородує замість основного металу. Другий підхід побудований на застосуванні зовнішнього джерела струму (*англ.* ICCP). Катодний захист із накладеним струмом (ICCP) реалізується шляхом подачі постійного струму від зовнішнього джерела живлення на захищувану конструкцію, що забезпечує зміщення її потенціалу у катодний бік і пригнічення корозійних процесів. Обидва методи по суті нав'язують системі режим, у якому захищуваний метал стає катодом, а анодні процеси його розчинення пригнічуються.

У сучасній практиці ключовою є критерій захисного потенціалу (із урахуванням омичного падіння напруги у ґрунті або електроліті) та контроль ризиків перезахисту: надмірне зміщення потенціалу може спричиняти, наприклад, інтенсифікацію виділення водню і ушкодження воднем високоміцних сталей. Для протяжних об'єктів (трубопроводи) додатково актуальна індукція від ліній електропередач змінного струму і відповідні критерії оцінки, які розглядають у сучасних наукових публікаціях щодо CP та взаємодії навантажень у мережах змінного і постійного струму.

Для внутрішніх поверхонь резервуарів і обладнання, що контактує з водою певного складу, у Європі застосовують стандартизовані підходи до катодного

захисту (наприклад, для морських та солонуватих вод застосовують окремі стандарти), а для інших середовищ використовують суміжні нормативні рамки та рекомендації виробників систем СР.

У агропромислових системах (ферми, елеватори, підприємства агропромислової переробки) електрохімічний захист часто комбінують з покриттями, контролем складу води, інгібіторами, а також конструктивними рішеннями для мінімізації гальванічних пар. Це важливо, тому що СР ефективний лише тоді, коли електричний контакт і розподіл потенціалу є керованими, а покриття має достатню суцільність (інакше струм концентрується на дефектах).

Сучасні напрямки досліджень

1) Використання «розумного» катодного захисту: системи ІССР з датчиками потенціалу поєднують із пристроями телеметрії та адаптивним керуванням струмом, що призводить до зменшення енерговитрат та профілактики перезахисту.

2) Поєднання СР з матеріалознавством: оцінка локальної корозії і критичних потенціалів для нових матеріалів і технологій виготовлення (зокрема адитивні технології).

3) Урахування впливу корозії, індукованої змінним струмом: актуальна тема для об'єктів, розташованих біля потужних електромереж. Досліджують критерії, співвідношення густин змінного і постійного струму та визначають методи моніторингу.

 **Цікаві факти.** Катодний захист часто вважають «електричною технологією корозії»: замість хімічного втручання змінюють електродний потенціал, тобто керують тим, які саме реакції термодинамічно та кінетично можливі на металі.

Ефективність СР суттєво залежить від якості діелектричних покриттів: добре покриття зменшує потрібний струм СР у рази, а отже і експлуатаційні витрати, але дефекти покриття можуть створювати «гарячі точки» корозійного ризику – тому моніторинг потенціалу та стану покриття є критичним.

Контрольні запитання до теми 11

1. Основні електрохімічні процеси та їх механізми.
2. Принцип роботи електролізу та електрокоагуляції.
3. Особливості ohmic heating.
4. Методи електростимуляції насіння.
5. Переваги та недоліки електрохімічних технологій.
6. Принцип катодного та анодного захисту.
7. Сучасні системи моніторингу корозії.
8. Роль електродіалізу у водоочищенні.
9. Комбіновані електрохімічні технології.
10. Перспективи розвитку електрохімії в агросекторі.

Тема 12. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ.

ЕЛЕКТРОГРАФІЯ

12.1 Електрографія

Електрографія (у практиці друку найчастіше – **електрофотографія** або **ксерографія**, від *англ. Electrophotography* або *Xerography*) – це технологія формування видимого зображення через створення **електростатичного латентного (прихованого) зображення** на фотопровідній поверхні та подальше перенесення заряджених частинок тонера або пігменту на носій (наприклад, папір). Ключовою ідеєю є кероване керування зарядом поверхні: в освітлених ділянках фотопровідник втрачає заряд, у неосвітлених – зберігає, формуючи карту електростатичного поля, яка притягує тонер. Така фізична схема є основою більшості лазерних принтерів, копіювальних апаратів та багатьох цифрових друкарських машин.

Типовий цикл електрофотографічного процесу включає послідовні стадії: заряджання, експонування (засвічування), проявлення (нанесення тонера), перенесення, закріплення (фіксація), очищення (і, залежно від системи, розрядження або відновлення поверхні).

- **Заряджання** виконується коронатором або зарядним роликом, які створюють рівномірний поверхневий потенціал на фотобарабані або фотострічці. У сучасних системах коронний розряд часто замінюється зарядними роликами, що зменшує утворення озону та спрощує екологічні вимоги (але підвищує вимоги до чистоти і стабільності контактів).

- **Експонування** здійснюється лазером або LED-лінійкою: освітлені ділянки фотопровідника отримують більшу провідність (зменшується електричний опір), тому заряд по таким ділянкам більш вільно рухається, формуючи електростатичний рельєф. Перевага – точність та повторюваність, а недолік – залежність від стабільності фотопровідника та оптики (забруднення, старіння).

- **Проявлення** полягає у підведенні тонера (сухого або рідкого) до фотоповерхні. Частинки тонера мають контрольований заряд і притягуються до ділянок потрібної полярності. У сухих системах важливі трибоелектричні

властивості тонера (зарядження тертям), у рідких – стабільність дисперсії та в'язкість.

• **Перенесення** здійснюється електростатично на папір, плівку або інший субстрат. Тут критичні адгезія, вологість, електропровідність носія та сила притискання.

• **Закріплення** переважно термічне: тонер плавиться і впікається у поверхню. Це забезпечує стійкість відбитка, але формує найбільшу частку теплонадходжень у процесі.

• **Очищення** – видалення залишків тонера та нейтралізація заряду. Недостатнє очищення призводить до фону, смуг, повторів зображення.

Окремою гілкою електрографії є **рідинна електрофотографія** (англ. LEP), де замість сухого тонера використовують пігментні частинки у рідкому носії. Зображення часто формується на проміжному полотні і переноситься на субстрат із термічним злиттям шару, що наближує результат до офсетної якості друку. Прикладом промислового впровадження є технологія HP Indigo (ElectroInk, thermal offset transfer).

Переваги електрографії як електротехнології:

1. висока керованість і повторюваність процесу (електричні параметри легко стабілізувати та автоматизувати);
2. висока продуктивність при цифровому керуванні (без друкарських форм);
3. можливість друку змінних даних (серіалізація, QR, простежуваність партій);
4. відносно сухий процес порівняно з багатьма фарбовими технологіями.

Недоліки та обмеження:

1. чутливість до пилу, вологості та стану фотоповерхні (старіння фотобарабанів, деградація органічних фотопровідників);
2. тепловитрати на закріплення;
3. вимоги до витратних матеріалів (тонери, девелопери, рідини), які задають істотну частку собівартості;
4. екологічні та гігієнічні аспекти (тонерний пил, озон у системах створення коронного розряду, наявність токсичних летких компонентів у частині рідинних схем).

Застосування в аграрному секторі виходить за рамки офісного друку. Електрографія є важливою для маркування і логістики: етикетки, QR-коди простежуваності, друк змінних даних для партій насіння, кормів, ветеринарних препаратів, для систем якості (НАССР/ISO). Ідея технологічного ефекту тут не друк заради друку, а інженерна інтеграція у ланцюги постачання: мінімізація помилок і підвищення керованості виробництва через уніфікований машинозчитуваний друк.

👉 **Сучасні напрями досліджень і розробок у електрографії:**

- **Нові фотопровідники** (органічні фотопровідники, багат шарові структури з оптимізованою рухливістю носіїв заряду). Мета дослідження – зменшити деградацію, підвищити ресурс барабана, знизити чутливість до впливу зміни температури і вологості.

- **Низькотемпературне закріплення:** тонери, що плавляться при нижчих температурах, або індукційні (ІЧ) системи ф'юзингу. Мета дослідження – зниження енергоспоживання та теплонадходжень, що критично для високопродуктивних ліній.

- **Тонери з вузьким розподілом частинок і контрольованою трибоелектрикою:** поліпшення градацій, зменшення смугастості зображення і фону.

- **Електрографія для функціональних матеріалів:** друк провідних або діелектричних шарів, включно з електронікою на гнучких носіях. Ідея – використати електростатичне перенесення дрібнодисперсних частинок для створення функціональних покриттів, а не лише зображень.

- **Гібридизація:** поєднання електрографії зі струменевими головками для створення спецефектів, мікродозування функціональних чорнил або лаків. Мета – поєднати сильні сторони обох технологій.

👉 **Цікавий факт:** ключовою особливістю технології електрофотографії є те, що зображення фактично формується не світлом напряму, а **керованим перерозподілом заряду** на фотоповерхні – і саме електростатика виконує роботу перенесення частинок, а оптика лише створює «карту провідності».

12.2 Електрокрапельні струменеві пристрої

Електрокрапельні струменеві пристрої – це клас технологій формування та керування краплями рідин (чорнил, суспензій, розчинів) за допомогою електричних полів. Важливо розрізняти кілька принципово різних схем, які в літературі та промисловості часто плутають під одним терміном.

1) *Безперервний струменевий друк (англ. CIJ)*

У CIJ формується безперервний струмінь, який розпадається на краплі з близькою частотою (за рахунок збурення). Далі кожній краплі надають заряд у зоні заряджання, після чого краплі відхиляються електростатичним полем між відхиляючими пластинами: потрібні краплі летять на носій, інші – на уловлювач і повертаються до системи.

Переваги: дуже висока швидкість, надійність на виробничих лініях, робота з різними субстратами, маркування на ходу (друк на пакуванні, тарі тощо).

Недоліки: складність обігу чорнил (рециркуляція), підвищені вимоги до їх в'язкості та провідності, ризики засмічення та деградації чорнил при тривалій роботі.

Приклади: маркування тари для продукції, кодування партій, швидкий друк на плівках і мішках.

2) *Друк «за вимогою» (англ. DOD)*

Крапля формується лише тоді, коли потрібна. У класичному DOD краплеутворення створюється термічним або п'єзоелектричним імпульсом. Електрокрапельні варіанти посилюють і стабілізують краплеутворення полем або застосовують електростатичне керування для підвищення точності та зменшення супутніх крапель.

Переваги: економне використання чорнил, висока якість друку, більш проста система без рециркуляції.

Недоліки: чутливість сопел до засмічення, обмеження за швидкістю для великих площ.

3) *Електрогідродинамічний струмінь (англ. EHD-Jet)*

Це метод, що потребує створення електричного поля найбільшої напруженості: між соплом і підкладкою прикладають високу напругу, електричне поле формує конус Тейлора і витягує надтонкий струмінь, що може давати краплі або безперервну нитку з дуже малим діаметром.

Ідея: отримати роздільну здатність значно вищу за класичний СІД аж до мікро- і субмікромасштабів і друкувати функціональні матеріали (наночорнила, полімери, біоматеріали).

Переваги: надвисока роздільна здатність, можливість друку провідних доріжок, сенсорних елементів, мікроструктур.

Недоліки: складність високовольної частини, вимоги до стабільності середовища, обмеження за продуктивністю для серійного друку.

Перспективи для АПК: мікродозування біоактивних препаратів, точне нанесення покриттів на насіння з мінімальною витратою діючої речовини.

4) Електроспрей як споріднена технологія

Тут мета не друк, а утворення аерозолю з контрольованими краплями або частинками. Електричне поле подрібнює рідину на заряджені краплі, що є фундаментальною базою для електроаерозольної обробки (див. тему 13).

Переваги: дрібнодисперсний аерозоль, керованість осадження за рахунок заряду.

Недоліки: високовольні вимоги, вплив вологості, електробезпека.

👉 Сучасні напрями досліджень для електрокрапельних систем:

- друк **функціональних чорнил** (провідні, діелектричні, фоточутливі), створення сенсорів для агромоніторингу;
- **біодрук** та нанесення біополімерних покриттів;
- інтеграція з комп'ютерним зором і **контролем краплеутворення у реальному часі** (дослідження впливу розміру і швидкості крапель);
- зниження енергоспоживання за рахунок оптимізації імпульсів, електродів і геометрії сопел;
- підвищення стійкості до засмічення: самоочищення сопел, ультразвукові і електростатичні режими очищення.

👉 **Цікавий факт:** у CIJ крапля перетворюється на піксель не завдяки механіці, а завдяки тому, що її траєкторія керується **силою Кулона**. Фактично це електростатичне сортування крапель за призначенням.

Контрольні запитання до теми 12

1. Що таке електрографія і яка роль електростатичного латентного зображення?
2. Опишіть стадії електрофотографічного процесу та їх призначення.
3. Які відмінності сухого тонера від рідинної електрофотографії (LEP – Liquid Electrophotography)?
4. Які основні фактори впливають на стабільність заряджання і якість проявлення?
5. У чому полягають енергетичні обмеження електрографії (закріплення, втрати)?
6. Поясніть принцип CIJ і роль електростатичного відхилення крапель.
7. Поясніть принцип DOD та його відмінності від CIJ.
8. Що таке EHD-jet і чому він забезпечує високу роздільну здатність?
9. Наведіть приклади застосування електрографії та електрокрапельних пристроїв у аграрній логістиці і переробці.
10. Які сучасні напрями досліджень у функціональному друці та керованому краплеутворенні?

Тема 13. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

13.1 Електроаерозольна обробка

Електроаерозольна обробка – це технології, в яких аерозоль (краплі рідини або тверді частинки у газі) наділяється електричним зарядом і керовано осаджується на цільову поверхню під дією електричного поля. Практично це означає, що частинки не просто розпилюють, а формують **заряджені краплі**, які електростатично притягуються до рослини, деталі, стінки камери тощо, що збільшує площу покриття, зменшує втрати на зношування і підвищує проникнення у важкодоступні зони кронного розряду.

Принцип дії електростатичного обприскування (основний різновид електроаерозольної обробки) базується на одному з **методів заряджання**:

- **коронне заряджання**: висока напруга створює коронний розряд, іони осідають на краплях;
- **індукційне заряджання**: крапля проходить крізь електродне поле і набуває індукованого заряду;
- **контактне заряджання**: крапля торкається зарядженого елемента або електрода.

У системах, що використовуються у аграрному секторі, найчастіше на практиці застосовують індукційні і коронні схеми, тому що вони сумісні з потоковим розпиленням і дають керований заряд і масу.

Переваги:

1. збільшення осадження на листі, включно з тильним боком (ефект «обтікання» листка зарядженими краплями);
2. потенційне зниження норми витрати робочого розчину при збереженні ефективності;
3. підвищення однорідності покриття і проникнення у густі насадження.

Ефект покращення покриття та осадження електростатичних систем порівняно зі звичайними підтверджується експериментальними роботами для культур та відкритого ґрунту.

Недоліки та інженерні обмеження:

1. високовольтна частина потребує підвищених вимог електробезпеки та екранування;
2. ефективність залежить від вологості, провідності розчину, розміру крапель та геометрії насаджень;
3. при неправильних режимах можливий нерівномірний заряд або підвищений дрейф дрібних крапель;
4. необхідна сумісність з насосами, форсунками та матеріалами (корозія, відкладення).

Типові електроустановки електроаерозольної обробки:

- **ручні електростатичні обприскувачі** для теплиць і невеликих господарств;
- **штангові системи** для тепличних рядів і багаторядних культур (вертикальні штанги з багатьма форсунками та зарядними електродами);
- **електростатичні модулі на безпілотниках**: напрям, що активно досліджується, оскільки заряджені краплі можуть частково компенсувати обмеження дрономеханіки (вітровий знос, нерівномірність покриття);
- **камерні електроаерозольні установки** для дезінфекції тари і обладнання.

👉 Сучасні напрями досліджень:

- оптимізація **заряду** або **маси** та спектра крапель для конкретної культури і архітектури крони;
- поєднання з **комп'ютерним зором** (оцінка густоти листя, автоматична зміна режимів заряджання і витрати);
- електроаерозольні системи для **зменшення хімічного навантаження** та більш точного внесення речовин;
- перевірка придатності використання на натурних об'єктах: поєднання лабораторної характеристики та результатів тестування на натурних об'єктах.

👉 **Цікавий факт:** електростатика в обприскуванні фактично додає ще один механізм транспорту крапель – окрім аеродинаміки, починає працювати

керований електростатичний дрейф, і саме він часто підвищує покриття (адгезію) прихованих поверхонь листя.

13.2 Інші види використання силової дії електричних полів

Під силовою дією електричних полів у електротехнологіях мають на увазі використання електростатичних (кулонівських) сил і/або поляризаційних сил (діелектрофорезу) для переміщення, осадження, утримання, сортування частинок або об'єктів.

1) Електростатичні осаджувачі (англ. ESP)

Принцип дії: пил або аерозоль у газі заряджається коронним розрядом, після чого частинки дрейфують до електродів-осаджувачів і видаляються.

Переваги: висока ефективність для тонкодисперсного пилу, низькі гідравлічні втрати.

Недоліки: потреба у високовольтній частині, залежність від провідності і вологості пилу.

Використання у агровиробництві: очищення повітря у зернопереробці, аспірація млинів, видалення пилу у комбікормових цехах.

2) Електростатичне керування порошками та гранулами

Ідея: заряджати порошкові фракції та керувати їх осадженням на поверхню (створення порошкових покриттів), або навпаки – запобігати налипанню шляхом нейтралізації заряду.

Використання у агровиробництві: антиадгезійні рішення у транспортних магістралях для порошкоподібних кормів.

3) Діелектрофорез (англ. DEP) у мікрофлюїдиці

Принцип дії: у неоднорідному електричному полі нейтральні, але поляризовні частинки (клітини, бактерії) рухаються у напрямку градієнта поля.

Переваги: висока селективність без хімічних реагентів.

Недоліки: обмежена продуктивність, складність електродів і каналів.

Перспектива використання у агровиробництві: експрес-діагностика якості молока або води, контроль мікробного забруднення.

4) Електроадгезія у роботизованих захватах

Принцип дії: гнучкий електродний «килимок» під напругою притягується до діелектричних поверхонь.

Перевага: дбайливе захоплення тонких об'єктів (плівки, пакети).

Недолік: залежність від вологості і забруднення.

Перспектива використання у агровиробництві: роботизація пакування агропродукції.

👉 Сучасні дослідження рухаються у напрямку збільшення автоматизації, використання цифрових алгоритмів для електростатичних пристроїв: створюються більш точні моделі взаємодії заряджених крапель, частинок з реальними поверхнями, досліджується керування формою поля, а також інтеграція з датчиками та цифровими алгоритмами (оптимізація режимів за критеріями ефективності осадження і мінімізації втрат).

Контрольні запитання до теми 13

1. Що таке електроаерозольна обробка і яка її мета?
2. Поясніть коронне та індукційне заряджання крапель.
3. Які параметри визначають ефективність електростатичного обприскування?
4. У чому проявляється ефект «обтікання» поверхні і чому він технологічно важливий?
5. Наведіть приклади електростатичних обприскувачів (ручні, штангові, UAV).
6. Які переваги та ризики електроаерозольних технологій у теплицях?
7. Опишіть принцип дії електростатичного осаджувача ESP.
8. Що таке діелектрофорез (DEP) і де він перспективний?
9. Поясніть ідею сучасних напрямів досліджень електроаерозольних систем (комп'ютерний зір, адаптивні режими, польова валідація)?
10. Які вимоги електробезпеки та надійності є критичними для електронно-іонних установок?

Тема 14. УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.

УСТАНОВКИ СЕПАРАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ

14.1 Класифікація сепараторів

Електричні сепаратори – це установки, які розділяють суміші частинок за рахунок різниці їх електричних властивостей: провідності, діелектричної проникності, здатності накопичувати або зберігати заряд, трибоелектричної поведінки (зарядження тертям).

За механізмом заряджання частинок сепаратори поділяють на:

- **коронно-електростатичні:** частинки заряджаються іонами від коронного розряду;
- **трибоелектричні:** частинки заряджаються під час контакту або тертя по стінках, трубах, інших частинках;
- **індукційні:** заряд індукується у електромагнітному полі та залежить від провідності середовища і його геометрії.

За геометрією електродів і траєкторією руху частинок сепаратори поділяють на:

- **барабанні (валкові):** суміш подається на валок; частинки, що мають електропровідні властивості, розряджаються швидше і змінюють свою траєкторію під час руху;
- **пластинчасті:** частинки рухаються у електричному полі між електродами та розділяються, притягуючись електродами-пластинами;
- **стрічкові:** електропровідні частинки рухаються на діелектричній стрічці у електричному полі та відділяються від поверхні транспортера із запізненням відносно основного частинок, що мають діелектричні властивості;
- **комбіновані з повітряним потоком** – для зменшення ударів і стабілізації траєкторій (актуальний сучасний тренд).

Властивості речовин, що розділяються, за якими класифікують сепаратори:

- провідність;
- знак або величина трибозаряду;

- можливість поляризації у неоднорідному полі (діелектрофоретичні підходи – рідше для масових гранулярних потоків, частіше для мікрофлюїдики).

Перевага електросепарації як класу – це **сухий процес** (часто без води), потенційно нижчі витрати на сушіння та реагенти, а недоліки – залежність від вологості, пилу, необхідність стабільного розміру та типорозмірного складу частинок та електробезпека високовольтного обладнання.

14.2 Принципи дії сепараторів по виду розподілу

1) Провіднісна сепарація на валкових (барабанних) сепараторах

Принцип дії: суміш подається на обертовий заземлений або заряджений барабан у присутності коронного електрода. Частинки заряджаються, але частина з них, що мають **електропровідні** властивості, швидко розряджаються при контакті з барабаном і втрачають електростатичне прилипання, тоді як інші частинки, що мають **діелектричні** властивості зберігають заряд довше і утримуються магнітним полем або адгезією, змінюючи траєкторію руху.

Переваги: ефективне розділення провідних домішок (метал) від діелектриків (пластик, органіка).

Недоліки: чутливість до вологості, поверхневих плівок та пилу; зношування електродів.

2) Трибоелектрична сепарація

Принцип дії: частинки різних матеріалів при терті набувають різного знаку і величини заряду (трибоелектричний ряд). Після заряджання суміш подається у зону електромагнітного поля; частинки відхиляються в різні боки відповідно до їх знаку заряду.

Переваги: не потребує коронного розряду для заряджання, добре зарекомендував для сумішей діелектриків (наприклад, полімери); сухий процес розділення.

Недоліки: сильна залежність від стану поверхні, вологості та наявності домішок; необхідність стабільного режиму тертя і заряджання.

Електростатичні сепаратори для сухого розділення пластиків виготовляються як серійне обладнання.

👉 Сучасні дослідження у цій галузі спрямовані на покращення керованості трибозаряду та траєкторій руху частинок. Зокрема, розробляють сепаратори з *коаксіальними циліндричними електродами* та допоміжним повітряним потоком, який зменшує удар частинок по електродах та стабілізує процес розділення.

3) Пластинчасті та польотні сепаратори

Принцип дії: частинки падають крізь електричне поле між електродами; відхилення визначається співвідношенням електростатичної сили до ваги та аеродинамічного опору потоку.

Переваги: простота контролю траєкторії руху при правильному складі та структурі суміші.

Недоліки: чутливість до турбулентності та пилоутворення; вимоги до стабільності потоку.

Практичне зауваження: ефективність електросепарації майже завжди вимагає підготовки матеріалу: сушіння до заданої вологості, стабілізації розміру частинок, усунення пилу, вирівнювання температури. Саме це часто визначає економічні витрати процесу більше, ніж паспортна ефективність електричного поля.

14.3 Застосування електричних сепараторів в сільському господарстві

У сільському господарстві електричні сепаратори використовують (або мають перспективу використання) у таких задачах:

1) Очищення та калібрування насіння і зерна

Електричні поля можуть допомагати відокремлювати домішки за провідністю та станом поверхні: металеві включення, частинки ґрунту, пилові фракції, частково – оболонки. Найбільший практичний сенс – доповнення до механічних або пневмосепараторів, коли потрібне тонке доочищення.

2) Розділення органічних і неорганічних домішок у кормових сумішах

Трибоелектрична поведінка багатьох порошків відрізняється, що відкриває можливість селективного розділення, однак технологія чутлива до вологості та потребує стабільних режимів.

3) Переробка агропластиків (плівка, тара, компоненти зрошення)

Це дуже практичний напрям: трибоелектричні сепаратори добре працюють для полімерів у сухому процесі.

4) Комбіновані схеми «електрика + повітря» для підвищення якості розділення.

Як показують сучасні наукові публікації, додавання спрямованого повітряного потоку допомагає стабілізувати рух гранул та підвищити селективність розділення.

👉 Сучасні напрями **досліджень** електросепараторів для сільського господарства:

- поєднання електросепарації з оптичним сортуванням (камера і спектральний датчик визначає тип частинки, електричне поле здійснює відхилення або підсилює розділення);
- моделювання впливу вологості та шорсткості на трибозаряд і релаксацію заряду;
- зниження пиловиділення та підвищення електробезпеки;
- перехід від лабораторних стендів до промислових прототипів з контролем параметрів потоку, поля та повітряної підтримки.

👉 **Цікавий факт:** у трибосепарації важливий не лише матеріал, що розділяється, але й вид його контакту у сепараторі: одна й та сама частинка може отримати інший заряд при зміні матеріалу трубопроводу або навіть при зміні шорсткості стінок, тому промислові лінії часто потребують стабілізації контактних поверхонь.

Контрольні запитання до теми 14

1. Які електричні властивості матеріалів використовують в електросепарації?
2. Поясніть коронно-електростатичне та трибоелектричне зарядження.
3. Опишіть принцип дії валкового (барабанного) сепаратора за провідністю.

4. У чому фізичний зміст трибоелектричного ряду і як він впливає на розділення?
5. Які фактори середовища (вологість, пил, температура) найбільш критичні для ефективної реалізації процесу сепарації?
6. Навіщо застосовують повітряний потік у сучасних трибосепараторах?
7. Які переваги і недоліки сухого процесу порівняно з мокрими методами?
8. Наведіть приклади застосування сепараторів в агросекторі та в переробці агропластиків.
9. Які підготовчі операції потрібні перед електросепарацією?
10. Які перспективні напрями досліджень електросепараторів для сільського господарства?

Тема 15. МАГНІТНА ОБРОБКА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ ТА МАТЕРІАЛІВ

15.1 Отримання магнітних полів

Магнітні поля в технологіях отримують від *постійних магнітів*, *електромагнітів* (котушок зі струмом), а також імпульсних систем, які створюють короткочасні сильні поля.

Постійні магніти (найчастіше на основі NdFeB – неодим-залізо-бор, або SmCo – самарій-кобальт) забезпечують високу індукцію без енергоспоживання. Їх перевага – простота та відсутність живлення, а недоліки – деградація при перегріванні та обмежена керованість поля.

Електромагніти (соленоїди, електромагнітні сердечники) дають можливість регулювати поле струмом і реалізувати перемикання (вмикання та вимикання). Переваги – керованість та інтеграція в автоматику, а недоліки – підвищене енергоспоживання, збільшені теплові втрати в обмотках, потреба у ефективному охолодженні.

Спеціальні конфігурації магнітного поля забезпечують:

- *котушки Гельмгольца* для створення відносно однорідного поля в зоні обробки;
- *високоградієнтні магнітні системи* з ферромагнітними матрицями, які створюють великі градієнти поля для захоплення дрібнодисперсних частинок;
- *імпульсні магнітні поля* – використовуються для досліджень впливу на структури матеріалів і можливих біоефектів. Вони потребують особливої уваги до безпеки і повторюваності.

👉 Сучасні наукові дослідження тут часто зосереджені на оптимізації геометрії магнітних систем через комп'ютерне моделювання поля, що дозволяє мінімізувати втрати енергії та підвищити селективність магнітного захоплення.

15.2 Магнітне очищення матеріалів

Магнітне очищення – найбільш усталений і практично значущий напрям. Мета застосування магнітного очищення полягає у видаленні ферромагнітних

домішок (заліза, сталі) або слабомагнітних частинок із зерна, борошна, комбікормів, гранул, а також із потоків сировини.

Типові установки, що використовують магнітне очищення, мають:

- **решітчасті магніти** для очистки у трубопроводах або бункерах;
- **плитні магніти**, що встановлюють над стрічковими конвеєрами;
- **барабанні магнітні сепаратори**, що використовуються для безперервного вилучення домішок;
- **самоочисні магнітні фільтри**, що використовуються для мінімізації ручного обслуговування.

Переваги установок: простота, висока надійність, майже нульові експлуатаційні витрати у випадку постійних магнітів, сильний ефект без складної підготовки матеріалу.

Недоліки установок: обмеженість за типом домішок (переважно магнітні), зниження ефективності при налипанні, на містках, потреба у правильному розташуванні та виборі швидкості потоку.

Сучасні напрямки розвитку:

- використання високопольових рідкоземельних магнітів для вилучення дрібних частинок;
- автоматизоване очищення магнітних елементів;
- комбінування з вібрацією та контрольованим потоком для уникнення екранування магнітних частинок у товщі матеріалу.

 **Цікавий факт:** магнітні вловлювачі – одна з небагатьох технологій, які безпосередньо знижують ризики пошкодження обладнання (млини, гранулятори) і водночас підвищують харчову або кормову безпеку, оскільки металева домішка є критичним дефектом.

15.3 Магнітна обробка матеріалів

Під магнітною обробкою матеріалів у технологічному сенсі можуть розуміти різні за доказовістю та механізмами підходи, тому коректно розділяти інженерно підтверджені та дослідницькі напрямки, розглянуті нижче:

1) Магнітно-асистована фільтрація та сорбція.

Ідея методу полягає у використанні магнітних сорбентів, частинки (наприклад, магнетиту Fe_3O_4 із функціоналізованою поверхнею), які зв'язують домішки, а потім вилучаються магнітом.

Переваги методу: швидке вилучення, можливість селективної хімії поверхні, потенційна регенерація сорбенту.

Недоліки методу: висока вартість сорбентів, необхідність контролю залишкових частинок, складність масштабування.

Перспективні напрямки впровадження для потреб АПК: очищення технологічних вод, видалення специфічних домішок (наприклад, барвників, органіки) у стоках переробки.

2) Високоградієнтна магнітна сепарація тонких фракцій (англ. HGMS).

Мета методу полягає у вилучення слабomagнітних або парамagнітних домішок у тонкодисперсних системах.

Переваги методу: робота з дуже дрібними частинками;

Недоліки методу: складність матриць, потреба у стабільному режимі потоку, вища вартість.

3) Магнітне модифікування структури матеріалів (у даний час це дослідницький напрям).

Ідея методу полягає у використанні впливу поля на процеси кристалізації, агрегації або реології суспензій. У промисловості такі ефекти часто залежать від складу та режимів, потребують суворої експериментальної перевірки.

Переваги (потенційні) методу: керування структурою без реагентів.

Недоліки методу: складність відтворення, сильна залежність від параметрів.

15.4 Магнітна обробка води

Магнітна обробка води – один із найпопулярніших на ринку, але науково неоднозначних напрямків. Коректно подавати його як технологію з переважно заявленою **метою**: зменшення накипу та вплив на кристалізацію солей жорсткості, а також як можливу допоміжну технологію у водопідготовці.

Принцип методу полягає у тому, що при протіканні води через магнітне поле змінюються умови зародження і росту кристалів карбонату кальцію. При цьому потенційно формується менш адгезійна модифікація кристалів, що знижує налипання на теплообмінних поверхнях. Деякі схеми доповнюються гідродинамічними умовами (турбулізація, змішування), які самі по собі можуть впливати на відкладення, тому в експериментах важливі контрольні групи.

Переваги методу: простота, відсутність реагентів, мінімальні витрати, легка інтеграція у трубопровід.

Недоліки методу: нестабільність результатів між різними водами та режимами, складність стандартизації, необхідність довготривалих натурних тестів, ризик завищених очікувань.

👉 Сучасні напрями досліджень у цій темі, які мають інженерний сенс:

- верифікація впливу поля на *морфологію кристалів* (методи мікроскопії, рентгенофазовий аналіз);
- моделювання *сумісного впливу* магнітного поля та гідродинаміки;
- поєднання з іншими методами протинакипного захисту (фільтрація, контроль рН, пом'якшення), де магнітний вплив розглядають як потенційний допоміжний чинник, а не єдине рішення.

👉 **Цікавий факт:** навіть якщо магнітний вплив на кристалізацію виявляється незначним, правильна інженерна постановка експерименту часто показує, що *гідродинаміка потоку* (швидкість, турбулентність, мертві зони тощо) може бути домінуючим фактором утворення накипу, тому магнітні пристрої інколи працюють як ненавмисні гідродинамічні модифікатори, і це потрібно відділяти від власне магнітного механізму.

Контрольні запитання до теми 15

1. Які способи отримання магнітних полів застосовуються у технологіях?
2. Переваги і недоліки постійних магнітів та електромагнітів.
3. Що таке високоградієнтна магнітна сепарація (HGMS) і де вона застосовується?
4. Які типи магнітних уловлювачів використовують у зерно- та кормопереробці?

5. Від чого залежить ефективність магнітного очищення у потоках гранул?
6. Опишіть магнітно-асистовану сорбцію та фільтрацію, її перспективи.
7. Які інженерні ризики виникають при роботі з сильними магнітами?
8. Які заявлені цілі магнітної обробки води і чому результати можуть бути нестабільними?
9. Які методи потрібні для наукової верифікації ефекту магнітної обробки води?
10. Назвіть перспективні напрями розвитку магнітних технологій у АПК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Albright, L. D. (2017). *Environment control for animals and plants*. ASABE.
2. American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2015). *Design of agricultural facilities and systems*. ASABE.
3. Baranov, V. Y. (2017). *Pulse power technology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55267-8>.
4. Barbosa-Cánovas, G. V., Zhang, Q. H., & Balasubramaniam, V. M. (2011). *Food engineering: Emerging technologies*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11004>.
5. Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471043729>.
6. Bruggeman, P., Kushner, M. J., Locke, B. R., Gardeniers, J. G. E., Graham, W. G., Graves, D. B., et al. (2016). Plasma–liquid interactions: A review and roadmap. *Plasma Sources Science and Technology*, 25(5), 053002. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>.
7. Cary, H. B., & Helzer, S. C. (2011). *Modern welding technology* (6th ed.). Pearson.
8. Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11–41. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>.
9. Coey, J. M. D. (2012). Magnetic water treatment – How might it work? *Philosophical Magazine*, 92(30), 3857–3865. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.685969>.
10. Dascalescu, L., Tilmatine, A., & Wiles, J. (Eds.). (2013). *Electrostatic separation of granular materials*. IET. <https://doi.org/10.1049/PBPO074E>.
11. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.
12. Elea GmbH. (2022). *Pulsed electric field (PEF) applications*. <https://elea-technology.com/en/applications/>.
13. Fronius International GmbH. (2022). *Advanced welding processes*. <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/processes>.
14. Gerber, R., & Birss, R. R. (1983). *High gradient magnetic separation: Theory and applications*. Research Studies Press.

15. Hielscher Ultrasonics GmbH. (2021). *Ultrasonic processing of liquids*. <https://www.hielscher.com/ultrasonic-processing.htm>.
16. Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470318635>.
17. Ho, K. H., & Newman, S. T. (2003). State of the art electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13), 1287–1300. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7).
18. Hutchings, I. M., & Martin, G. D. (2012). *Inkjet technology for digital fabrication*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118452940>.
19. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). Wiley.
20. Inculet, I. I. (1984). *Electrostatic separation*. Research Studies Press.
21. Jaworek, A., & Krupa, A. (2016). Triboelectrification and electrostatic separation. *Journal of Electrostatics*, 80, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.01.002>.
22. Jaworek, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A., & Czech, T. (2013). Electrospray phenomena. *Journal of Electrostatics*, 71(2), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.12.005>.
23. Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
24. Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1990). *Introduction to mineral processing*. Wiley.
25. Knorr, D., Ade-Omowaye, B. I. O., & Heinz, V. (2011). Non-thermal processing of plant foods. *Trends in Food Science & Technology*, 22(10), 611–620. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.05.002>.
26. Kolb, J. F., Joshi, R. P., Xiao, S., & Schoenbach, K. H. (2008). Streamer discharges in water. *Journal of Physics D*, 41(23), 234007. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/23/234007>
27. Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471434027>
28. Kudra, T. (2019). *Energy aspects in drying*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315150111>

29. Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K. P., & Schumacher, B. M. (2005). Advancing EDM. *CIRP Annals*, 54(2), 599–622. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60034-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60034-6).
30. Lancaster, J. F. (1986). *The physics of welding*. Pergamon.
31. Law, S. E. (2001). Electrostatic spray application. *Journal of Electrostatics*, 51–52, 25–42. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(01\)00140-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00140-7).
32. Lincoln Electric Company. (2021). *Welding solutions guide*.
33. Locke, B. R., Sato, M., Sunka, P., Hoffmann, M. R., & Chang, J. S. (2006). Electrohydraulic discharge. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(3), 882–905. <https://doi.org/10.1021/ie051113k>.
34. Lund, H., Ostergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2017). Smart energy systems. *Energy*, 137, 556–565.
35. Malik, M. A. (2010). Water purification by plasma. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 30(1), 21–31. <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>.
36. Mason, T. J. (2002). *Sonochemistry*. Oxford University Press.
37. Mujumdar, A. S. (Ed.). (2014). *Handbook of industrial drying* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17208>
38. Newman, J., & Thomas-Alyea, K. E. (2004). *Electrochemical systems* (3rd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471477567>.
39. Oberteuffer, J. A. (1974). Magnetic separation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 10(2), 223–238. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1974.1058336>.
40. Pashkov, V., & Krot, P. (2020). Electric furnaces design. *Journal of Physics: Conference Series*, 1426, 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012017>.
41. Piyasena, P., Mohareb, E., & McKellar, R. C. (2003). Ultrasound in food processing. *International Journal of Food Microbiology*, 87(3), 207–216. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(03\)00075-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00075-8).
42. Pletcher, D., & Walsh, F. C. (1990). *Industrial electrochemistry*. Chapman & Hall.
43. Pioro, I., & Duffey, R. (2015). *Heat transfer at supercritical pressures*. ASME Press.
44. Rastogi, N. K. (2013). Ultrasound processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(7), 705–722. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.571798>.

45. Robinson, M., & Smith, D. (2016). Electrostatic precipitators. In *Handbook of air pollution control engineering*. Wiley.
46. Rosensweig, R. E. (1985). *Ferrohydrodynamics*. Cambridge University Press.
47. Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Greenhouse climate control. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(4), 771–788. <https://doi.org/10.13031/aea.12615>.
48. Suslick, K. S. (1990). Sonochemistry. *Science*, 247(4949), 1439–1445. <https://doi.org/10.1126/science.247.4949.1439>.
49. Svoboda, J. (2004). *Magnetic techniques for the treatment of materials*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2038-2>.
50. Toepfl, S., Heinz, V., & Knorr, D. (2006). Pulsed electric fields. *Chemical Engineering and Processing*, 45(6), 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.11.011>.
51. Totten, G. E. (Ed.). (2006). *Steel heat treatment handbook* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420009169>.
52. U.S. Department of Energy. (2020). *Energy efficiency for agricultural applications*.
53. Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' mineral processing technology* (8th ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16309-2>.
54. Yutkin, L. A. (1980). *Electrohydraulic effect*.
55. Zielinski, M., & Jaworski, M. (2018). *Industrial electric heating systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70924-9>.

Козін Віктор Миколайович,
Савойський Олександр Юрійович,
Сіренко Юлія Володимирівна

Електротехнології в АПВ

**Методичні вказівки щодо виконання самостійної роботи
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. 4,6
