

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

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В АПК

конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми
здобуття вищої освіти

Миколаїв
2026

УДК 621.3:631

E50

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

Укладачі:

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

Рецензенти:

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

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

© Миколаївський національний аграрний університет, 2026

ЗМІСТ

Модуль 1. Електронагрівальні установки.....	7
1.1. Техніко-економічні основи використання електроенергії в теплових і технологічних процесах сільськогосподарського виробництва.....	7
1.2. Способи і пристрої перетворення електричної енергії в теплову.....	15
1.3. Електричні нагрівання опором.....	23
1.4. Побічне нагрівання опором.....	32
1.5. Електричні водонагрівачі.....	41
1.6. Електротермічне обладнання систем мікроклімату в спорудах захищеного ґрунту.....	49
1.7. Електронагрівальні установки для теплової обробки і сушіння с.-г. продуктів і кормів.....	57
1.8. Електричні холодильні машини і теплові насоси.....	68
Модуль 2. Електротехнологічні установки.....	74
2.1. Електротермічне обладнання ремонтних підприємств.....	74
2.2. Побутові електронагрівальні прилади.....	81
2.3. Основи електронно-іонної технології.....	90
2.4. Електричні іонізатори повітря та обробка електричним струмом.....	98
2.5. Електроімпульсна техніка і технологія.....	106
2.6. Ультразвукова техніка і технологія.....	114
2.7. Магнітна обробка матеріалів.....	122

ВСТУП

Сучасний агропромисловий комплекс України функціонує в умовах зростаючих вимог до енергоефективності, технологічної надійності, якості продукції та раціонального використання ресурсів. За таких умов особливого значення набувають електротехнології як сукупність способів і технічних засобів, у яких електрична енергія безпосередньо використовується для здійснення теплового, електрофізичного, електрохімічного та інших видів технологічного впливу на сировину, матеріали, біологічні об'єкти й виробниче середовище. Саме електротехнологічні процеси забезпечують нагрівання води та повітря, сушіння сільськогосподарської продукції, обігрів тваринницьких і тепличних приміщень, пастеризацію, стерилізацію, передпосівну обробку матеріалів, а також виконання низки спеціальних операцій у ремонтному та допоміжному виробництві.

Дисципліна «Електротехнології в АПК» посідає важливе місце у фаховій підготовці здобувачів вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», оскільки формує розуміння фізичних основ електротехнологічних процесів, принципів дії та конструктивних особливостей відповідного обладнання, методів його вибору, розрахунку й раціонального застосування в умовах аграрного виробництва. Опанування цієї дисципліни дає змогу майбутньому фахівцеві оцінювати техніко-економічну доцільність використання різних способів електронагріву, аналізувати режими роботи електротермічних установок, визначати їхні енергетичні показники, забезпечувати надійність, безпечність і ефективність експлуатації.

Конспект лекцій розроблено з метою систематизації навчального матеріалу та надання здобувачам вищої освіти цілісного уявлення про основні напрями використання електротехнологій у АПК. У ньому послідовно розглянуто техніко-економічні основи застосування електроенергії в теплових і технологічних процесах, способи перетворення електричної енергії в теплову, особливості прямого та непрямого нагріву, будову і параметри електронагрівального обладнання, зокрема трубчастих електронагрівачів, нагрівальних проводів і кабелів, а також питання застосування індукційного, діелектричного та інших спеціальних методів обробки в аграрній сфері.

Особливу увагу в конспекті приділено прикладному аспекту дисципліни: вибору способу нагріву залежно від фізичних властивостей матеріалу, умов технологічного процесу, вимог до точності регулювання температури, енергоощадності та виробничої безпеки. Такий підхід сприяє формуванню у здобувачів навичок інженерного мислення, уміння аналізувати виробничі ситуації, обґрунтовувати технічні рішення та застосовувати набуті знання у практиці аграрного виробництва.

Конспект лекцій призначений для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання і може бути використаний під час підготовки до лекційних, практичних і лабораторних занять, самостійної роботи, виконання розрахункових завдань та підсумкового контролю. Видання спрямоване на засвоєння теоретичних положень дисципліни та їх подальше

застосування при вивченні спеціальних фахових освітніх компонентів і в майбутній професійній діяльності.

МОДУЛЬ 1. ЕЛЕКТРОНАГРІВАЛЬНІ УСТАНОВКИ

Лекція 1.1

Тема: «Техніко-економічні основи використання електроенергії в теплових і технологічних процесах АПК»

ПЛАН

1. Роль електроенергії в агропромисловому комплексі. Поняття електротехнології
2. Переваги електротехнологічних методів перед традиційними
3. Способи перетворення електричної енергії в теплову. Класифікація електронагрівального обладнання
4. Основи динаміки електронагріву. Тепловий баланс
5. Тепловий ККД і питома витрата електроенергії
6. Температурні режими та енергетичні показники теплових процесів у сільськогосподарському виробництві

1. Роль електроенергії в агропромисловому комплексі. Поняття електротехнології

Агропромисловий комплекс (АПК) є одним з найбільших споживачів електричної енергії в національній економіці. Електроенергія тут виконує одночасно дві функції: є носієм енергії для силових процесів і безпосереднім інструментом впливу на предмет праці - воду, повітря, корм, ґрунт, насіння, живі організми.

У сучасному тваринництві, птахівництві та рослинництві від третини до 60 % усієї спожитої на виробничі потреби електроенергії витрачається саме в теплових процесах: підігрів води для напування й миття, опалення приміщень, сушіння кормів і зерна, пастеризація молока, стерилізація ґрунту в теплицях. Ця частка стабільно зростає разом з автоматизацією та інтенсифікацією виробництва.

Поняття «електротехнологія» охоплює сукупність способів обробки матеріалів, при яких електрична енергія перетворюється в робочій зоні безпосередньо в інший вид енергії (теплову, механічну, хімічну, світлову) без проміжних пристроїв - двигунів, окремих нагрівачів чи випромінювачів. Головна відмінність від класичної електрифікації - тут сам електричний струм, поле або розряд є інструментом обробки, а не лише джерелом приводу механізму.

Відповідно до виду енергетичного перетворення весь масив електротехнологічного обладнання поділяють на три великі групи: електротермічне (перетворення в теплоту), електрофізичне (механічна, світлова дія) та електрохімічне (хімічні реакції на електродах). У практиці АПК найбільш масово використовується перша група, тому саме вона є головним предметом вивчення в цьому курсі.

Важливим показником розвитку галузі є електроозброєність праці - відношення встановленої потужності електроустановок до кількості зайнятих. Цей показник прямо корелює з продуктивністю праці та якістю кінцевої продукції. За даними 2023–2024 рр. провідні агропідприємства України і ЄС демонструють питому потужність електрообладнання 8–15 кВт на одного зайнятого в тваринництві, що у 3–4 рази перевищує середній показник по галузі.

2. Переваги електротехнологічних методів перед традиційними

Порівняно з газовим, вугільним або дизельним нагрівом електричні методи мають ряд принципових переваг, що визначають їхнє стратегічне місце в АПК.

По-перше, точність і відтворюваність параметрів. Електронагрівальне обладнання дозволяє підтримувати задану температуру з точністю $\pm 0,5-1$ °С, що є критичним для пастеризації молока (63–72 °С), інкубації яєць (37,5–38 °С) та інших технологічних процесів. Паливні установки забезпечують точність не краще $\pm 3-5$ °С.

По-друге, гнучкість регулювання і швидкодія. Потужність електротермічного обладнання можна змінювати практично миттєво - зміною напруги, тиристорним регулюванням або перемиканням ступенів нагрівачів.

Паливний нагрів має значну теплову інерційність і не дозволяє так само швидко реагувати на зміни навантаження.

По-третє, чистота технологічного середовища. Електричний нагрів не дає продуктів горіння, і тому можливий у закритих приміщеннях з тваринами та птицею без примусової витяжки, пов'язаної зі значними тепловими втратами взимку.

По-четверте, порівняно низькі витрати на обслуговування та висока надійність. Електронагрівачі не мають рухомих частин, не потребують чищення від сажі та нагару. Термін служби трубчастих електронагрівачів (ТЕНів) при правильній експлуатації становить 10–15 років, тоді як пальники паливних установок потребують заміни значно частіше.

Водночас слід об'єктивно враховувати і недоліки. Питома вартість електроенергії в Україні стабільно зростає: у 2024 році промисловий тариф становив 4,32–5,5 грн/кВт·год залежно від класу напруги, тоді як еквівалентна теплота від природного газу обходилась дешевше. Тому вибір між електричним і паливним нагрівом завжди є техніко-економічним завданням, яке вирішується для кожного конкретного технологічного процесу, з урахуванням капітальних вкладень, тарифів та умов експлуатації.

Для більшості теплових процесів АПК низькотемпературного діапазону (до 100 °С) застосування електронагріву є економічно обґрунтованим, особливо з урахуванням простоти автоматизації та мінімальних витрат на обслуговування.

3. Способи перетворення електричної енергії в теплову. Класифікація електронагрівального обладнання

Фізичні основи перетворення електричної енергії в теплову визначають і способи нагріву, і конструкцію обладнання. Закон Ленца–Джоуля - основний фізичний закон для всіх резистивних методів нагріву. Він стверджує, що кількість теплоти Q (Дж), яка виділяється при протіканні струму через провідник, визначається добутком: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$, де I - діюче значення струму (А),

R - опір (Ом), τ - час (с). Цей закон є фундаментом для розрахунку всіх резистивних нагрівачів.

Нагрів методом опору реалізується у двох варіантах. При прямому нагріві струм проходить безпосередньо через матеріал, що нагрівається: контактний спосіб - для металів і сплавів, електродний спосіб - для рідин (електролітів). При непрямому (елементному) нагріві струм проходить через спеціальний нагрівальний елемент, виготовлений зі спеціального сплаву, а теплота від нього передається матеріалу конвекцією, теплопровідністю або випромінюванням. Саме цей метод є найпоширенішим у сільськогосподарських електронагрівачах - трубчасті нагрівачі (ТЕНи) широко застосовуються у водонагрівачах, калориферах, інкубаторах.

Індукційний нагрів - матеріал, що підлягає нагріванню, розміщується в змінному магнітному полі індуктора. В провідному матеріалі наводяться вихрові струми (струми Фуко), які й нагрівають його за законом Ленца–Джоуля. Метод особливо ефективний для нагріву металів без контакту, застосовується в ремонтних майстернях для загартування, пайки.

Діелектричний нагрів відбувається за рахунок поглинання енергії діелектричними матеріалами у змінному полі високої частоти (13,56 МГц або 2,45 ГГц - для мікрохвильового нагріву). Питома потужність, що виділяється в одиниці об'єму: $P = 2\pi f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E^2 \cdot \text{tg}\delta$, де f - частота (Гц), ϵ_r - відносна діелектрична проникність, E - напруженість поля (В/м), $\text{tg}\delta$ - тангенс кута втрат. Перевага - рівномірний об'ємний нагрів, що особливо важливо при сушінні зерна та насіння.

Дуговий нагрів використовує тепло електричної дуги - іонізованого газу з температурою 4000–15000 °С. Застосовується в зварювальному обладнанні, але не в технологічних теплових процесах АПК. За режимом роботи електронагрівальне обладнання поділяється на установки безперервної дії (калорифери, проточні водонагрівачі) та переривчастої дії (смісні водонагрівачі, інкубатори). За робочою температурою виділяють низькотемпературне обладнання (до 500 °С), середньотемпературне (до 1250 °С) і високотемпературне (понад 1250 °С). Для АПК характерні виключно

низькотемпературні процеси - здебільшого до 200–300 °С, а найчастіше й до 100 °С.

4. Основи динаміки електронагріву. Тепловий баланс

Розуміння динаміки нагріву необхідне для правильного вибору потужності та часу роботи установки. Якщо до матеріалу з повною теплоємністю C_t підводиться постійна теплова потужність P , а матеріал через поверхню F обмінюється теплотою з навколишнім середовищем з коефіцієнтом тепловіддачі kt , то перевищення температури матеріалу ν над температурою навколишнього середовища змінюється за законом:

$\nu(\tau) = \nu_{уст} \cdot (1 - e^{-\tau/T})$, де $\nu_{уст} = P / (kt \cdot F)$ - усталене перевищення температури, $T = C_t / (kt \cdot F)$ - постійна часу нагріву.

Постійна часу T показує, наскільки швидко установка виходить на робочий режим. При $\tau = T$ температура досягає 63 % від усталеного значення. Практично вважається, що установлений режим настає після $\tau = 5T$. Для більшості водонагрівачів АПК T становить 20–60 хвилин, для великих ємнісних - до декількох годин.

При відключенні установки охолодження відбувається за симетричним законом: $\nu(\tau) = \nu \cdot e^{-\tau/T}$. Це означає, що за один інтервал часу T температура знижується до 37 % від початкового перевищення.

Тепловий баланс будь-якої електротермічної установки описує рівняння: $Q_{над} = Q_{вит}$, де прихід теплоти включає теплоту від електронагрівачів ($Q_{ен}$), теплоту від біологічних об'єктів ($Q_{б}$, тварини і птиця виділяють тепло), теплоту від електрообладнання ($Q_{ео}$ - електродвигуни вентиляторів, насосів). Витрата охоплює корисно використану теплоту ($Q_{кор}$), теплоту на нагрів допоміжних конструкцій і тари ($Q_{доп}$), а також теплові втрати через огороджувальні поверхні ($Q_{вт}$). Вміння розкласти тепловий баланс на складові - ключова навичка при проектуванні та налагодженні електротермічних установок.

5. Тепловий ККД і питома витрата електроенергії

Загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) електротермічної установки є добутком електричного та термічного ККД: $\eta = \eta_e \cdot \eta_t$. Електричний ККД враховує втрати в елементах електричного кола. Для установок з нагрівом опором він близький до 1,0. В установках індукційного нагріву $\eta_e = 0,5-0,7$ через втрати в трансформаторі та індукторі. Для установок діелектричного нагріву НВЧ-діапазону $\eta_e = 0,65-0,70$, оскільки магнетрон як перетворювач має власний ККД.

Термічний ККД показує, яка частка від виділеної нагрівачем теплоти йде безпосередньо на нагрів цільового матеріалу: $\eta_t = Q_{\text{кор}} / (Q_{\text{кор}} + Q_{\text{доп}} + Q_{\text{вт}})$. Із закону динаміки нагріву випливає важливий практичний висновок: η_t зменшується з часом і прагне до нуля при виході на усталений тепловий режим. Тому тривале підтримання матеріалу при постійній температурі - найменш ефективний режим роботи з точки зору ККД. Для підвищення η_t слід збільшувати якість і товщину теплоізоляції (зменшувати $\text{км}\cdot\text{F}$), а також прискорювати процес нагрівання підвищенням питомої потужності нагрівача.

Питома витрата електроенергії (ω) характеризує економічність процесу і визначається залежно від типу установки. Для установок переривчастої дії: $\omega_1 = R_{\text{уст}} \cdot \tau / V$ (кВт·год/ м^3) або $\omega_2 = R_{\text{уст}} \cdot \tau / (V \cdot \rho)$ (кВт·год/кг). Для установок безперервної дії: $\omega = R_{\text{уст}} / L$, де L - продуктивність ($\text{м}^3/\text{год}$ або $\text{кг}/\text{год}$). Питома витрата електроенергії пов'язана із загальним ККД установки оберненою залежністю: що вищий ККД, то менша питома витрата. Наприклад, для пастеризації молока теоретична мінімальна питома витрата становить близько 15–20 кВт·год/т, а реальні установки досягають показника 20–35 кВт·год/т залежно від конструкції та теплоізоляції.

6. Температурні режими та енергетичні показники теплових процесів у сільськогосподарському виробництві

Теплові процеси АПК охоплюють широкий діапазон температур - від 12 °С при підігріві питної води для великої рогатої худоби до 300 °С при сушінні деяких видів сільськогосподарської сировини. Проте переважна більшість

процесів є низькотемпературними (до 100 °С), що є принциповою відмінністю АПК від промислових металургійних чи хімічних підприємств.

У тваринництві вода для напування підігрівається до 12–20 °С, для приготування кормів - до 40–65 °С, для миття молочного обладнання - до 55–65 °С, для підмивання вимені - до 37–38 °С. Температура в тваринницьких приміщеннях підтримується в межах 8–20 °С, а в пташниках - 16–35 °С залежно від віку птиці. Підлогове обігрівання поросят вимагає температури підлоги 32–36 °С у перший тиждень з поступовим зниженням до 22 °С до четвертого тижня.

У рослинництві захищеного ґрунту температура ґрунту парників підтримується в межах 18–25 °С, повітря теплиць - 20–30 °С. Активне вентилявання сільськогосподарської продукції потребує підігріву повітря до 10–35 °С, а сушіння зерна або сіна - до 30–300 °С залежно від типу сушарки та виду продукції.

Фізичні характеристики матеріалів, з якими доводиться мати справу в АПК, суттєво відрізняються від металів і визначають специфіку теплових розрахунків. Питома теплоємність картоплі складає 3,56 кДж/(кг·°С), буряка - 3,76, зерна - 2,3, соломи - 2,3, тоді як вода має 4,19 кДж/(кг·°С). Ці значення важливі для розрахунку потужності нагрівача: $P = m \cdot c \cdot \Delta t / (3600 \cdot \tau \cdot \eta)$, де m - маса матеріалу (кг), c - питома теплоємність (кДж/(кг·°С)), Δt - необхідний перепад температур, τ - час нагрівання (год), η - ККД установки.

Окрему увагу слід приділити процесам, що пов'язані з фазовими перетвореннями. Випаровування 1 кг води потребує затрати 2257 кДж енергії (теплота пароутворення), що приблизно у 5–6 разів більше, ніж потрібно для нагріву цього ж кілограма від 0 до 100 °С. Саме тому сушіння є найенергоємнішим тепловим процесом в АПК. Реальні електросушарки витрачають 1,5–3,0 кВт·год на 1 кг випареної вологи залежно від початкової вологості матеріалу та конструкції установки. Ці показники є еталоном для оцінки ефективності конкретного обладнання.

Актуальним напрямком розвитку енергетики АПК у 2024–2026 роках є інтеграція електротермічного обладнання з відновлюваними джерелами енергії

(сонячні панелі, біогазові установки) та накопичувачами тепла для роботи в режимі управління попитом. Це дозволяє знижувати витрати на електроенергію за рахунок її споживання в години мінімального тарифу та зберігання у вигляді нагрітої води або акумульованого тепла.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Яку частку від загального споживання електроенергії становлять теплові процеси в сучасному аграрному підприємстві і яка тенденція цього показника?

2. У чому принципова відмінність поняття «електротехнологія» від поняття «електрифікація» виробничого процесу?

3. Назвіть три класи речовин за електрофізичними властивостями і поясніть механізм виділення теплоти в кожному з них при проходженні електричного струму або дії електричного поля.

4. Сформулюйте закон Ленца–Джоуля та запишіть його в диференціальній і інтегральній формах. Де кожна з форм зручніша для практичних розрахунків?

5. Чим відрізняються прямий і непрямий методи нагріву опором? Наведіть приклади сільськогосподарського обладнання для кожного методу.

6. Що таке постійна часу нагріву T і як вона пов'язана з теплоємністю матеріалу та тепловіддачею установки? Як використати це поняття при виборі режиму роботи водонагрівача?

7. Запишіть рівняння теплового балансу електротермічної установки для тваринницького приміщення взимку. Які складові приходу і витрати теплоти в ньому присутні?

8. Поясніть, чому тепловий ККД установки зменшується в часі і прагне до нуля при усталеному тепловому режимі. Як це враховується при виборі режиму роботи водонагрівача-термоса?

9. Визначте потужність електронагрівача для нагрівання 500 кг зерна від $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 2 години, якщо загальний ККД установки 0,85.

10. Порівняйте питому витрату електроенергії для пастеризації молока і для сушіння зерна. Чим пояснюється суттєва різниця цих показників?

Лекція 1.2

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

ПЛАН

1. Прямий нагрів методом опору: електроконтактний та електродний способи
2. Непрямий (елементний) нагрів опором. Матеріали нагрівальних елементів
3. Трубчасті електронагрівачі (ТЕНи): конструкція, параметри, вибір
4. Нагрівальні дроти та кабелі для сільськогосподарського виробництва
5. Індукційний та діелектричний нагрів: принцип дії та застосування в АПК
6. Класифікація електронагрівального обладнання. Вибір способу нагріву

1. Прямий нагрів методом опору: електроконтактний та електродний способи

Нагрів методом опору є найпоширенішим у практиці АПК. Його фізична основа - закон Ленца–Джоуля: при проходженні електричного струму I через провідник з опором R протягом часу τ виділяється теплота $Q = I^2 \cdot R \cdot \tau$ (Дж). Теплова потужність нагрівача $P = U^2/R = I^2 \cdot R$ (Вт), де U - напруга живлення. Спосіб реалізується у двох принципово різних варіантах: прямому і непрямому нагріві.

При прямому нагріві електричний струм проходить безпосередньо крізь матеріал, що нагрівається. Електроконтактний спосіб застосовують для нагріву металів і сплавів. Через контактні пристрої напруга подається до металевої деталі, яка нагрівається при протіканні струму. Метод використовується в ремонтних майстернях для розігріву болтових з'єднань, відпалу дроту, підігріву труб. Перевага - висока швидкість нагріву та мінімум втрат, оскільки тепло виділяється рівномірно по всьому об'єму металу.

Електродний спосіб застосовують для рідин з іонною провідністю - води, молока, розчинів електролітів, вологого ґрунту. Рідина, укладена між електродами, утворює провідник, в якому при протіканні струму за законом Ленца–Джоуля виділяється теплота. У пристроях електродного нагрівання застосовують виключно змінний струм, оскільки постійний спричиняє

електроліз і руйнування електродів. Навіть при змінному струмі за значних щільностей струму спостерігаються електролітичні явища, тому нагрівання виконують при щільності струму не більше $0,5 \text{ A/cm}^2$ для плоских електродів і до $1,5\text{--}2 \text{ A/cm}^2$ для циліндричних.

Теплова потужність, Вт, що виділяється в одному міжелектродному проміжку з плоско-паралельними електродами: $P = U^2 \cdot \gamma \cdot S / l$, де U - напруга між електродами (В), γ - питома електрична провідність матеріалу (Om^{-1}/m), S - площа електродів (m^2), l - відстань між ними (м). При нагріванні провідність збільшується, тому потужність зростає до закипання, після чого знижується через зменшення провідності парогазової суміші. Цей нелінійний характер необхідно враховувати при проектуванні електродних нагрівачів.

Матеріали електродів обирають залежно від середовища нагрівання. Для технічних потреб (підігрів води для опалення) достатньо конструкційної сталі або латуні. Для нагрівання продуктів, що йдуть на годування або напування тварин, електроди не повинні утворювати токсичних оксидів, тому застосовують нержавіючу сталь або нікельовані поверхні. Графіт і вугілля теоретично хімічно безпечні, але рідко використовуються через складність механічної обробки.

2. Непрямий (елементний) нагрів опором. Матеріали нагрівальних елементів

При непрямому нагріванні електричний струм проходить не через матеріал, що нагрівається, а через спеціальний нагрівальний елемент з матеріалу з великим питомим опором. Теплота від нагрівального елемента передається матеріалу конвекцією, теплопровідністю або інфрачервоним випромінюванням - залежно від конструкції установки. Принципова перевага методу - можливість нагріву будь-якого матеріалу незалежно від його електрофізичних властивостей. Саме тому непрямий нагрів є найбільш масово застосованим в АПК: він лежить в основі всіх водонагрівачів, калориферів, інкубаторів і теплиць.

Вибір матеріалу нагрівального елемента визначається насамперед необхідною робочою температурою та агресивністю середовища. Матеріал

повинен мати жаростійкість (не окислюватися при нагріванні), жароміцність (зберігати механічну міцність при підвищеній температурі), великий питомий електричний опір (що дозволяє виготовити нагрівач компактних розмірів) і малий температурний коефіцієнт опору (щоб потужність установки не змінювалася при розігріві).

Хромонікелеві сплави - ніхроми - найповніше відповідають цим вимогам. Сплав Х20Н80 (80 % нікелю, 20 % хрому) витримує робочу температуру до 1100 °С, має питомий опір 1,0–1,1 мкОм·м і малий температурний коефіцієнт опору. Сплав Х15Н60 (60 % нікелю, 15 % хрому, решта - залізо) дешевший і застосовується для нагрівачів з робочою температурою до 950 °С. Для нагрівачів сільськогосподарського призначення з робочою температурою 300–400 °С цілком достатньо дешевих сплавів Х25Н20 і Х23Н18.

Хромоалюмінієві сплави - фехралі - дешевші за ніхроми, але механічно крихкіші при підвищених температурах. Сплав Х13Ю4 (13 % хрому, 4 % алюмінію, основа - залізо) застосовують для нагрівачів з робочою температурою до 700 °С. Для потужних нагрівачів з температурою до 1100 °С використовують хромонікельалюмінієві сплави типу Х15Н60Ю3А, які завдяки зниженому вмісту нікелю коштують дешевше стандартних ніхромів. У найпростіших низькотемпературних установках з робочою температурою 300–400 °С можна застосовувати звичайну конструкційну сталь, яка є дешевою і доступною, хоча і має значний температурний коефіцієнт опору.

За конструктивним виконанням нагрівальні елементи поділяють на відкриті, закриті та герметичні. Відкриті - дріт або стрічка з нагрівального сплаву, скручені в спіраль або укладені зигзагом на керамічних ізоляторах. Тепло від них передається конвекцією та інфрачервоним випромінюванням. Закриті розміщені в захисному кожусі, що захищає від механічного впливу, - тепло передається переважно конвекцією. Герметичні - ТЕНи - є найпоширенішими у сільськогосподарському виробництві.

3. Трубчасті електронагрівачі (ТЕНи): конструкція, параметри, вибір

Трубчастий електронагрівач (ТЕН) є герметичним нагрівальним елементом, в якому нагрівальна спіраль з дроту з великим питомим опором (ніхром або фехраль) запресована в металеву тонкостінну трубку-оболонку з порошкоподібним наповнювачем. Як наповнювач застосовують кристалічний оксид магнію (периклаз) або кварцовий пісок - матеріали з поєднанням хорошої електроізоляції та теплопровідності. Кінці спіралі з'єднані з контактними стрижнями, герметизованими термовологостійким лаком.

Матеріал оболонки визначає область застосування ТЕНа. Мідна оболонка забезпечує найкраще тепловіддавання і застосовується для нагріву питної води (зазвичай луджена або нікельована для підвищення корозійної стійкості). Оболонка з вуглецевої сталі використовується для нагріву сухого повітря та мінерального масла при температурі оболонки не вище 400–450 °С. Оболонка з нержавіючої сталі застосовується для нагріву агресивних середовищ та при температурі оболонки понад 450 °С. Алюмінієва оболонка застосовується для нагрівачів у побутових електроплитах та деяких спеціальних установках.

Основний параметр ТЕНа - питома поверхнева потужність $PF = P / (\pi \cdot D \cdot l_a)$ (Вт/см²), де P - потужність (Вт), D - зовнішній діаметр оболонки (см), l_a - активна довжина (см). Гранично допустиме значення PF визначається умовами роботи: при нагріві повітря у вільній конвекції - не більше 2 Вт/см², при примусовій конвекції повітря - до 4 Вт/см², при нагріві нерухомої води - до 7 Вт/см², при примусовій циркуляції води - до 11 Вт/см². Перевищення допустимої PF призводить до перегріву наповнювача, виходу з ладу спіралі та різкого скорочення терміну служби ТЕНа.

Кількість ТЕНів для конкретної установки визначається зі співвідношення $n = P_{уст} / P_1$, де $P_{уст}$ - встановлена потужність установки (Вт), P_1 - номінальна потужність одного ТЕНа. Для рівномірного завантаження трифазної мережі число ТЕНів рекомендується приймати кратним трьом. У маркуванні ТЕНів, наприклад ТЕН-100А12,5/2,0У220, цифра 100 - розгорнута довжина в сантиметрах, А12,5 - зовнішній діаметр 12,5 мм, 2,0 - номінальна потужність 2,0 кВт, У - умовне позначення середовища (вода), 220 - напруга живлення.

Для раціонального розміщення в установках ТЕНи виготовляють різної форми: прямі, П-подібні, U-подібні, кільцеві. При нагріві газоподібних середовищ для підвищення тепловіддачі застосовують ребристі ТЕНи, де на оболонку додатково напресовані алюмінієві або мідні ребра. Ребра збільшують площу теплообміну в 3–5 разів, що дозволяє суттєво скоротити габарити калориферних установок.

4. Нагрівальні дроти та кабелі для сільськогосподарського виробництва

Нагрівальні дроти та кабелі є різновидом елементних нагрівачів, адаптованих для розподіленого підігріву протяжних об'єктів: ґрунту теплиць і парників, підлоги тваринницьких приміщень, водопроводів та технологічних трубопроводів. Струмopровідна жила виготовляється зі спеціальної сталі або ніхромового сплаву і покривається електроізоляційною оболонкою. Їхня відмінність від звичайних ТЕНів - у можливості вільного згинання при монтажі без порушення цілісності та можливості рівномірного розподілу теплоти по великій площі.

Нагрівальні дроти серій ПОСХП, ПОСХВ застосовуються при робочих температурах до 40 °С - для обігріву ґрунту в теплицях, підлоги пташників і свинарників, запобігання замерзанню водопроводів на введенні в приміщення. Дріт ПНВСВ підвищеної надійності має додаткову фторопластову ізоляцію, екран із сталевих дротиків діаметром 0,3 мм і зовнішню ПВХ оболонку, що в 4–5 разів збільшує термін служби.

Нагрівальні кабелі можуть мати до трьох ніхромових струмopровідних жил, ізольованих кристалічним оксидом магнію, азбестом або кремнієорганічною гумою. Зовні кабель захищений оболонкою зі свинцю, алюмінію або нержавіючої сталі. Кабелі з магнезитовою ізоляцією та оболонкою з нержавіючої сталі розраховані на температуру до 400 °С і при монтажі вільно згинаються без пошкодження, що зручніше за ТЕНи в ряді технологічних ситуацій. Важливе обмеження: довжину і переріз нагрівального дроту або

кабелю не можна змінювати в полі (підрізати) без перерахунку, оскільки це призводить до зміни потужності і перегріву.

При проектуванні систем ґрунтового обігріву теплиць питому потужність зазвичай приймають 80–120 Вт/м² для весняно-осінньої доби та 150–200 Вт/м² для зимового режиму. Крок укладки нагрівального кабелю в ґрунті вибирається таким чином, щоб забезпечити рівномірне температурне поле при мінімальному перегріві найближчих до кабелю шарів ґрунту. Сучасні системи управління на основі ПЛК і датчиків температури ґрунту на кількох рівнях дозволяють знизити витрати електроенергії на 25–35 % порівняно з нерегульованими системами.

5. Індукційний та діелектричний нагрів: принцип дії та застосування в АПК

Індукційний нагрів - безконтактний метод, при якому енергія передається матеріалу через змінне електромагнітне поле. Провідний матеріал, що підлягає нагріванню, розміщується всередині котушки-індуктора, по якій проходить змінний струм. Змінний магнітний потік, що утворюється котушкою, наводить в матеріалі вихрові струми (струми Фуко), які нагрівають його за законом Ленца–Джоуля. Тепло при цьому виділяється безпосередньо в об'ємі матеріалу - це прямий нагрів. Перевага методу - висока швидкість нагріву, можливість локального розігріву окремих ділянок деталі, відсутність фізичного контакту між нагрівачем і матеріалом, що дозволяє нагрівати деталі у вакуумі або захисній атмосфері.

ККД індукційних установок промислового виконання становить $\eta_e = 0,5-0,7$ через втрати в трансформаторі та індукторі. Для підвищення ККД застосовують компенсаційні конденсатори, що компенсують реактивну складову навантаження. В АПК індукційний нагрів застосовується в ремонтних майстернях для загартування ріжучих органів сільськогосподарських машин, пайки металоконструкцій, демонтажу іржавих з'єднань. Індукційні підігрівачі вузлів, де неможливо застосувати паяльник або пальник, незамінні при ремонті в польових умовах. Оскільки нагрів відбувається лише в провідних матеріалах,

діелектрики (гума, пластики, мастила) не нагріваються, що дозволяє вибірково розігрівати металеву деталь, не пошкоджуючи навколишні елементи.

Діелектричний нагрів використовує здатність полярних діелектриків поглинати енергію змінного електромагнітного поля. Матеріал, що нагрівається, розміщують між обкладками конденсатора, підключеного до джерела живлення високої або надвисокої частоти. Питома теплова потужність, що виділяється в об'ємі діелектрика: $p = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg}\delta$ (Вт/м³), де f - частота поля (Гц), ϵ_r - відносна діелектрична проникність матеріалу, E - напруженість поля (В/м), $\operatorname{tg}\delta$ - тангенс кута втрат. Принципова перевага - нагрів починається одночасно по всьому об'єму матеріалу, а не від поверхні всередину, як при конвективному або кондуктивному нагріві. Це дозволяє сушити зерно та насіння рівномірно без небезпеки перегріву зовнішнього шару.

Мікрохвильовий (НВЧ) нагрів на частоті 2,45 ГГц є окремим випадком діелектричного нагріву і застосовується в промислових установках для розморожування м'яса та риби, пастеризації рідких продуктів, стерилізації ґрунту. ККД мікрохвильових установок $\eta_e = 0,65-0,70$ завдяки ефективному магнетрону як генератору. Для зернових сушарок НВЧ-нагрів поки лишається нішевим рішенням через значну вартість обладнання, але при ціновому паритеті з конвективними сушарками може замінити їх завдяки 2–3-кратному скороченню часу сушіння та кращій якості продукту.

6. Класифікація електронагрівального обладнання. Вибір способу нагріву

Електронагрівальне обладнання класифікують за кількома незалежними ознаками. За способом перетворення електричної енергії в теплову: нагрів методом опору (прямий і непрямий), індукційний, дуговий, діелектричний, термоелектричний (ефект Пельтьє), лазерний. За видом нагріву: прямий (теплота виділяється безпосередньо в матеріалі) і непрямий (поза матеріалом). За режимом роботи: безперервної дії (калорифери, проточні водонагрівачі) і переривчастої дії (ємнісні водонагрівачі, термостати). За робочою

температурою: низькотемпературне (до 500–600 °С), середньотемпературне (до 1250 °С) і високотемпературне (понад 1250 °С). Для АПК характерне виключно низькотемпературне обладнання - здебільшого до 200–300 °С. За родом і частотою струму: промислова частота (50 Гц), підвищена (400–10 000 Гц), висока (>10 кГц), надвисока (МГц-діапазон). За напругою живлення: до 1 кВ і понад 1 кВ. Переважна більшість сільськогосподарського обладнання живиться від мережі 380/220 В.

При виборі способу електронагріву для конкретного технологічного процесу керуються кількома критеріями. Першим є фізичний стан і електрофізичні властивості матеріалу. Електроліти (вода, молоко, розчини) найефективніше нагрівати електродним методом або ТЕНами; металеві деталі - електроконтактним або індукційним; непровідні матеріали (зерно, корм, деревина) - ТЕНами непрямого нагріву або діелектричним методом. Другим критерієм є необхідна температура і точність її підтримання. При вимогах до точності $\pm 0,5-1$ °С - непрямий нагрів ТЕНами з регулятором температури; при вимогах $\pm 5-10$ °С - будь-який спосіб з терморегулятором. Третій критерій - економічність в конкретних умовах. Електродний нагрів води має ККД до 0,99, але вимагає доведення питомого опору води до нормативних значень. Непрямий нагрів ТЕНами дає ККД 0,85–0,95 і не висуває вимог до якості середовища.

Сучасна тенденція 2024–2026 років у проектуванні електронагрівальних установок АПК - впровадження інверторного регулювання потужності замість ступінчастого перемикання нагрівальних елементів. Інверторне управління за допомогою тиристорних або IGBT-регуляторів забезпечує безступінчасте регулювання потужності від 5 до 100 % і дозволяє утримувати температуру з точністю $\pm 0,2-0,5$ °С без перерегулювання. Це особливо важливо для пастеризаційних установок, інкубаторів та сушарок для насінневого матеріалу. Питоме споживання енергії при інверторному управлінні знижується на 15–25 % порівняно зі ступінчастим регулюванням за рахунок усунення теплових коливань навколо заданої температури.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У чому відмінність між прямим і непрямим нагрівом методом опору? Наведіть по два приклади сільськогосподарського обладнання для кожного варіанту.

2. Чому в пристроях електродного нагрівання застосовується виключно змінний струм? Яка допустима щільність струму для плоских і циліндричних електродів?

3. Запишіть формулу теплової потужності електродного нагрівача з плоско-паралельними електродами. Як змінюється потужність у процесі нагрівання рідини до кипіння і поясніть чому?

4. Які вимоги ставляться до матеріалів нагрівальних елементів? Порівняйте ніхром Х20Н80 і фехраль Х13Ю4 за основними характеристиками.

5. Опишіть конструкцію ТЕНа. Що визначає вибір матеріалу оболонки? Для яких середовищ призначені ТЕНи з мідною, сталеву та нержавіючою оболонками?

6. Що таке питома поверхнева потужність ТЕНа і яких максимальних значень вона може досягати при нагріві повітря та води? Що станеться при перевищенні допустимого значення?

7. Для якої мети в АПК застосовуються нагрівальні дроти і кабелі? Назвіть два типи нагрівальних дротів і вкажіть їхні основні відмінності.

8. Поясніть принцип дії індукційного нагріву. Де в АПК застосовуються індукційні установки і яке значення має електричний ККД типових індукційних нагрівачів?

9. Запишіть формулу питомої теплової потужності для діелектричного нагріву. Які параметри матеріалу і поля визначають інтенсивність нагріву? Чим відрізняється НВЧ-нагрів від класичного діелектричного?

10. Порівняйте електродний, ТЕН-нагрів та НВЧ-нагрів за ККД, точністю регулювання температури та вимогами до якості нагрівного середовища. Для яких процесів АПК кожен з методів є оптимальним?

Лекція 1.3

Тема: «Електричні нагрівання опором (прямий нагрів)»

ПЛАН

1. Питомий електричний опір провідників першого і другого роду. Залежність від температури
2. Поверхневий ефект при змінному струмі. Еквівалентна глибина проникнення
3. Електроконтактний нагрів: принцип, установка, розрахунок джерела живлення
4. Електродний нагрів: принцип, конструкції електродних систем
5. Допустима щільність струму та напруженість поля в електродних системах
6. Розрахунок електродних нагрівальних пристроїв. Застосування в АПК

1. Питомий електричний опір провідників першого і другого роду. Залежність від температури

Прямий нагрів методом опору - це перетворення електричної енергії в теплову безпосередньо в матеріалі, що нагрівається, без проміжного нагрівального елемента. Для реалізації прямого нагріву матеріал повинен мати електропровідність - тобто належати до провідників першого або другого роду.

Провідники першого роду - метали та їхні сплави. У них носіями заряду є вільні електрони. Щільність електричного струму $j = \gamma \cdot E$ (А/м²), де γ - питома електрична провідність (1/(Ом·м)), E - напруженість поля (В/м). Зворотна величина $\rho = 1/\gamma$ - питомий електричний опір (Ом·м). Опір провідника з постійним перерізом $R = \rho \cdot l/S$ (Ом), де l - довжина (м), S - площа поперечного перерізу (м²).

Питомий опір металів залежить від температури за лінійним законом у діапазоні до 300 °С: $\rho(t) = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$, де ρ_{20} - питомий опір при 20 °С, α - температурний коефіцієнт опору (для металів $\alpha > 0$, тобто опір зростає з температурою), Δt - перевищення над 20 °С. Для чистих металів $\alpha \approx 0,004$ °С⁻¹. Домішки підвищують питомий опір: введення 0,1–0,2 % заліза в мідь збільшує її опір у 1,5–2 рази. Типові значення питомого опору металів лежать у діапазоні $1,7 \cdot 10^{-8} \dots 1,4 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Провідники другого роду - електроліти (водні розчини солей, кислот, лугів, молоко, соки). У них носіями заряду є іони. Питомий опір електролітів принципово відрізняється від металів: він зменшується при нагріванні, оскільки підвищення температури посилює дисоціацію молекул і зростає рухливість іонів. Питома електропровідність електроліту при довільній температурі t : $\gamma(t) = \gamma_{20} \cdot [1 + \beta \cdot (t - 20)]$, де γ_{20} - провідність при 20 °С, $\beta \approx 0,025 \dots 0,035 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. При $\beta = 0,025$ питомий опір електроліту: $\rho(t) = 40 \cdot \rho_{20} / (t + 20)$. Це означає, що при нагріванні від 20 до 80 °С питомий опір води знижується майже втричі, що необхідно враховувати при розрахунку потужності електродних нагрівачів.

При температурі 20 °С залежно від концентрації та складу солей питомий опір природної та технічної води коливається від 2 до 100 Ом·м. Питна вода для напування тварин має $\rho_{20} = 10 \dots 50$ Ом·м, котлова вода після пом'якшення - 0,2...1,0 Ом·м. Знання питомого опору є вихідним параметром для проектування будь-якого електродного нагрівача.

2. Поверхневий ефект при змінному струмі. Еквівалентна глибина проникнення

При проходженні змінного струму через металевий провідник виникає поверхневий ефект: щільність струму не є рівномірною по перерізу, а розподіляється з максимумом на поверхні та зменшується у напрямку до осі за показниковим законом $j(x) = j_m \cdot e^{(-x/z_0)}$, де x - відстань від поверхні, z_0 - еквівалентна глибина проникнення струму.

Еквівалентна глибина проникнення $z_0 = 503 \cdot \sqrt{(\rho / (\mu_r \cdot f))}$ (м), де ρ - питомий опір матеріалу (Ом·м), μ_r - відносна магнітна проникність, f - частота струму (Гц). Для $f = 50$ Гц формула спрощується: $z_0 = 71,2 \cdot \sqrt{(\rho / \mu_r)}$ (мм). Фізичний сенс: на глибині z_0 від поверхні щільність струму зменшується в $e = 2,71$ рази порівняно з поверхнею. У шарі товщиною z_0 виділяється близько 86 % загальної теплоти.

На практиці поверхневий ефект при промисловій частоті 50 Гц є помітним лише для феромагнітних матеріалів (сталь з $\mu_r \approx 200$ має $z_0 \approx 3,3$ мм) і несуттєвим

для кольорових металів (мідь - $z_0 \approx 9,4$ мм, алюміній - $z_0 \approx 12,4$ мм). Це означає, що при електроконтактному нагріванні сталевих деталей промисловою частотою струм концентрується у відносно тонкому приповерхневому шарі, і рівномірність нагрівання по перерізу деталі гірша, ніж при постійному струмі. Для тонких деталей (менше $2 \cdot z_0$) поверхневий ефект незначний і нагрів можна вважати рівномірним.

Коефіцієнт поверхневого ефекту $k_p = R_{\sim}/R_{=}$ - це відношення опору провідника змінному струму до опору постійному. Для круглого провідника діаметром d : $k_p = \pi \cdot d \cdot z_0 / (d - z_0) \cdot \pi \cdot z_0 \approx 4 \cdot z_0 / (d - z_0)$ при $z_0 \ll d$. Потужність, що виділяється при змінному струмі $P_{\sim} = k_p \cdot I^2 \cdot R_{=}$. Врахування поверхневого ефекту важливе при розрахунку джерела живлення електроконтактних установок, особливо для деталей зі сталі діаметром більше 10 мм.

3. Електроконтактний нагрів: принцип, установка, розрахунок джерела живлення

Електроконтактний нагрів - прямий нагрів металевих деталей за рахунок виділення теплоти при протіканні електричного струму через саму деталь. Цей метод застосовується для нагрівання заготовок і деталей з чорних і кольорових металів перед гарячою обробкою тиском (кування, штампування, гнуття), для термічної обробки (загартування, відпуск, відпал) та контактного зварювання. У ремонтному виробництві АПК електроконтактний нагрів незамінний при відкручуванні сильно заіржавілих різьбових з'єднань, пресуванні підшипників та знятті шестерень.

Принципова схема установки: понижувальний трансформатор з вторинною напругою 5–25 В, через контактні пристрої підключений до деталі, що нагрівається. Такі малі напруги необхідні, оскільки опір металевих деталей надзвичайно малий (одиниці–десятки мілі-Ом), і для виділення потрібної теплової потужності потрібні струми від сотень до тисяч ампер. Застосовують виключно змінний струм: він зручно трансформується і не спричиняє електролізу при контакті зі зволженими деталями. Контактні пристрої

притискаються до деталі з додатковим зусиллям F за допомогою гідравлічних, пневматичних або механічних пристосувань - для мінімізації перехідного контактного опору, який є основним джерелом небажаних втрат тепла поза деталлю.

Потужність, Вт, що виділяється в деталі: $P = U^2/R = I^2 \cdot R$, де R - повний опір деталі змінному струму з урахуванням поверхневого ефекту. Корисна теплова потужність для нагрівання деталі масою m (кг) з питомою теплоємністю c (Дж/(кг·°C)) від t_1 до t_2 за час τ (с): $P_{кор} = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) / \tau$. З урахуванням ККД установки $\eta = 0,55 \dots 0,82$ загальна потужність, яку повинен забезпечити трансформатор: $P_{заг} = P_{кор} / \eta$. ККД нижчий при малому відношенні довжини деталі до поперечного перерізу - тоді значна частка теплоти втрачається через контактні пристрої. Оптимальні деталі для цього методу - вали, прутки, труби довжиною понад 0,5 м.

Вторинна напруга трансформатора визначається з формули $U_2 = \sqrt{(R \sim \cdot P_{заг})}$, де $R \sim$ - середнє значення опору деталі при змінному струмі за час нагрівання. Потужність трансформатора у В·А: $S_{тр} = P_{заг} / (\eta_{тр} \cdot \cos\phi \cdot \sqrt{ПВ})$, де $\eta_{тр} = 0,90 \dots 0,95$ - ККД трансформатора, $\cos\phi = 0,6 \dots 0,85$ - коефіцієнт потужності, ПВ - відносна тривалість вмикання установки. Відносна тривалість вмикання $ПВ = \tau_r / (\tau_r + \tau_p)$, де τ_r - час нагрівання (с), τ_p - час паузи між циклами (с). При $ПВ = 0,5$ і $\cos\phi = 0,7$ потужність трансформатора буде в $1,4 \cdot \sqrt{2} \approx 2$ рази більшою від середньої потужності нагрівання - це необхідно враховувати при виборі обладнання.

4. Електродний нагрів: принцип, конструкції електродних систем

Електродний нагрів - прямий нагрів рідин та вологих матеріалів з іонною провідністю шляхом пропускання через них змінного електричного струму між металевими електродами. Матеріал з іонною провідністю, укладений між електродами, утворює рідинний провідник: при протіканні струму за законом Ленца–Джоуля в ньому виділяється теплота. Цей метод широко застосовується

у водонагрівачах для тваринництва, пастеризаційних установках, електродних котлах опалення, а також для обігріву вологого ґрунту в теплицях та парниках.

Обов'язкова умова: в електродних нагрівачах застосовують виключно змінний струм. При постійному струмі неминуче відбувається електроліз - електрохімічне розкладання рідини з виділенням газів на електродах, їх прискореним руйнуванням і зміною складу нагрівного середовища. Навіть при змінному струмі за надмірних щільностей струму спостерігаються часткові електролітичні явища, тому щільність струму необхідно обмежувати.

Теплова потужність, Вт, що виділяється між плоско-паралельними електродами: $P = U^2 \cdot \gamma \cdot S / l$, де U - напруга між електродами (В), γ - питома електропровідність рідини ($1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$), S - площа електродів (м^2), l - відстань між ними (м). Оскільки γ зростає при нагріванні, потужність нагрівача при постійній напрузі монотонно збільшується від початкової температури до температури кипіння, після чого падає - газові бульбашки парогазової суміші різко знижують провідність. Цей нелінійний характер необхідно враховувати при виборі потужності та системи захисту.

За конструкцією електродних систем розрізняють три основних типи. Перший - система з двома плоскими паралельними електродами: найпростіша конструкція, застосовується в однофазних нагрівачах малої потужності (до 5–10 кВт). Другий - трифазна система з трьома плоскими електродами, зігнутими під кутом 120° : забезпечує симетричне навантаження мережі, використовується в потужних водонагрівачах (10–100 кВт і більше). Третій - коаксіальна система з внутрішнім і зовнішнім циліндричними електродами: схема заміщення - зірка, компактніша за плоску, зручна в трубчастих нагрівачах для проточного підігріву води. При використанні плоских електродів з електроізоляційною ємністю схема заміщення - трикутник; з провідною ємністю (металевий корпус) - з'являються додаткові резистори в зірці, що ускладнює розрахунок.

5. Допустима щільність струму та напруженість поля в електродних системах

Головне обмеження при проектуванні електродних нагрівачів - недопущення електролізу, який починається за щільності струму вище критичного значення. Для плоских електродів допустима щільність струму $j_{доп} \leq 0,5 \text{ А/см}^2$. Більш точно: $j_{доп} = 16/\sqrt{\rho_2} \text{ (А/см}^2\text{)}$, де ρ_2 - питомий опір рідини при кінцевій (максимальній) температурі нагрівання ($\text{Ом}\cdot\text{см}$), розрахованій за формулою $\rho_2 = 40 \cdot \rho_{20}/(t_2 + 20)$. Для електродів циліндричної форми (коаксіальних систем) допустима щільність струму вища - $1,5 \dots 2 \text{ А/см}^2$ - завдяки більш рівномірному полю.

В установках переривчастої (тактової) дії при постійній напрузі щільність струму не залишається сталою в процесі нагрівання: вона зростає разом з підвищенням температури, оскільки провідність рідини збільшується. Тому конструктивні параметри (площа електродів S , відстань l) розраховують з умови неперевикнення $j_{доп}$ при кінцевій температурі, тоді як у початковий момент щільність струму є мінімальною і встановлена потужність реалізується не повністю. В установках безперервної дії після виходу на усталений тепловий режим щільність струму в кожній поперечній зоні нагрівача стабілізується і не змінюється.

Напруженість електричного поля E (В/см) і щільність струму j (А/см^2) зв'язані співвідношенням $E = \rho \cdot j$, де ρ - питомий опір матеріалу при відповідній температурі. Для плоско-паралельних електродів поле однорідне: $E = U/l$, де l - відстань між електродами (см). Для коаксіальних електродів напруженість неоднорідна: $E(r) = U/(r \cdot \ln(r_2/r_1))$, де r - поточний радіус (см), r_1 і r_2 - радіуси внутрішнього і зовнішнього електродів. З цього виходить важливий практичний наслідок: напруженість поля максимальна на внутрішньому електроді і мінімальна на зовнішньому, тому ймовірність пробоя найвища поблизу внутрішнього електрода.

Максимальна допустима напруженість поля в міжелектродному просторі: $E_{доп} = E_{пр}/(1,5 \dots 2)$, де $E_{пр}$ - пробивна напруженість матеріалу, що нагрівається. Пробивна напруженість залежить від питомого опору рідини: більш концентровані розчини мають нижчу пробивну напруженість. Для питної води з

$\rho_{20} \approx 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ типове значення $E_{пр} \approx 100\text{--}200 \text{ В/см}$. Дотримання обох обмежень - по щільності струму та напруженості поля - є обов'язковою умовою надійної та безпечної роботи електродного нагрівача протягом усього розрахункового терміну служби.

6. Розрахунок електродних нагрівальних пристроїв. Застосування в АПК

Розрахунок електродного нагрівача виконується в такій послідовності. Спочатку визначають потрібну потужність. Для нагрівача переривчастої дії корисна потужність $P_{кор} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1) / \tau$ (Вт), де V - об'єм рідини (м^3), ρ - щільність (кг/м^3), c - питома теплоємність ($\text{Дж/кг}\cdot\text{°C}$), t_1 і t_2 - початкова та кінцева температури (°C), τ - час нагрівання (с). Потрібна потужність з урахуванням ККД: $P_{потр} = P_{кор} / \eta_{т}$, де $\eta_{т}$ - термічний ККД нагрівача.

Для нагрівачів переривчастої дії потужність змінюється від P_1 (при t_1) до P_2 (при t_2). Оскільки потужність пропорційна провідності рідини, $P_2/P_1 = (t_2 + 20)/(t_1 + 20)$. Середня розрахункова потужність $P_{розр} = (P_1 + P_2)/2$. З цих двох рівнянь знаходять $P_2 = 2 \cdot P_{потр} / [1 + (t_1 + 20)/(t_2 + 20)]$. Для нагрівачів безперервної дії потужність стала і $P_{розр} = P_{потр}$. Далі, прийнявши допустиму щільність струму $j < j_{доп}$, визначають робочу площу одного електрода $S = I_{розр} / j$, де $I_{розр} = P_{розр} / U$. З площі S та конструктивних обмежень (висота h і ширина b) підбирають розміри електродів так, щоб $h \cdot b = S$.

Міжелектродна відстань l знаходять з формули $l = U^2 \cdot S \cdot \gamma_2 / P_{розр} = U \cdot S / (I_{розр} \cdot \rho_2 / l)$, де ρ_2 - питомий опір рідини при кінцевій температурі. Спрощено: $l = U \cdot \gamma_2 \cdot S / I_{розр}$. Завершують розрахунок перевіркою дійсної напруженості поля: $E = U/l \leq E_{доп}$. Якщо умова не виконується, збільшують l або зменшують U (вибирають іншу схему включення трифазної мережі - фазна замість лінійної напруги).

Практичне застосування електродного нагріву в АПК охоплює кілька напрямків. Електродні водонагрівачі для тваринництва (типу ВЭП-600, КЕВ-4М та ін.) нагрівають воду до $12\text{--}20 \text{ °C}$ для напування або до $55\text{--}65 \text{ °C}$ для миття

молочного обладнання з ККД 0,97–0,99 - найвищим серед усіх водонагрівачів. Електродні котли (типу КЕВ, ЕПЗ) для опалення тваринницьких і птахівницьких приміщень потужністю від 25 до 1000 кВт є конкурентами газових котлів там, де відсутній газопровід. У 2024–2025 рр. в умовах нестабільного газопостачання попит на електродні котли в Україні суттєво зріс. Ключова вимога до експлуатації: питомий опір котлової води повинен відповідати нормативному значенню (паспорту котла) - зазвичай $\rho_{20} = 10\text{--}50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. При відхиленні потужність котла може відрізнятись від номінальної в 2–5 разів.

Обігрів ґрунту в теплицях за допомогою заземлених електродів, між якими пропускають змінний струм, застосовується для прискореного проростання насіння і стерилізації ґрунту від збудників хвороб. Температура ґрунту підтримується 18–28 °С. При проектуванні таких систем необхідно ретельно перевіряти рівень крокової напруги між електродами - вона не повинна перевищувати 2 В на відстані кроку 0,8 м, щоб унеможливити ураження людей і тварин.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У чому принципова різниця між провідниками першого і другого роду з точки зору носіїв заряду? Як змінюється питомий опір кожного типу при підвищенні температури?

2. Запишіть формулу залежності питомого опору металу від температури. Як домішки впливають на питомий опір? Наведіть конкретний приклад.

3. Запишіть формулу залежності питомого опору електроліту від температури. Розрахуйте, у скільки разів зменшиться питомий опір питної води ($\rho_{20} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) при нагріванні від 20 до 60 °С.

4. Поясніть фізичну суть поверхневого ефекту. Від яких параметрів залежить еквівалентна глибина проникнення струму? Для яких матеріалів він суттєвий при промисловій частоті 50 Гц?

5. За якою формулою розраховується еквівалентна глибина проникнення для $f = 50 \text{ Гц}$? Порівняйте значення z_0 для сталі ($\mu_r = 200$, $\rho = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$) та міді ($\mu_r = 1$, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

6. Опишіть принципову схему установки електроконтактного нагріву. Чому застосовують малі напруги (5–25 В) і великі струми? Яка роль понижувального трансформатора?

7. Що таке відносна тривалість вмикання ПВ і як вона впливає на розрахункову потужність трансформатора установки електроконтактного нагріву?

8. Чому в електродних нагрівачах застосовують виключно змінний струм? Що станеться при використанні постійного струму?

9. Назвіть три конструктивні типи електродних систем. У чому переваги коаксіальної системи порівняно з плоскою? Де поле в коаксіальній системі є максимальним і чому?

10. Яка допустима щільність струму для плоских і циліндричних електродів? Чому в установці переривчастої дії щільність струму зростає в процесі нагрівання і як це враховується при розрахунку?

Лекція 1.4

Тема: «Побічне нагрівання опором (непрямий нагрів)»

ПЛАН

1. Принцип непрямого нагріву. Вимоги до матеріалів нагрівальних елементів
2. Матеріали нагрівальних елементів: ніхроми, фехралі, сталь
3. Конструктивні виконання нагрівачів: відкриті, закриті, герметичні (ТЕНи)
4. Розрахунок нагрівального елемента: переріз, довжина, температура поверхні
5. Нагрівальні дроти і кабелі: типи, допустима питома потужність, розрахунок
6. Схеми включення і регулювання потужності елементних нагрівачів

1. Принцип непрямого нагріву. Вимоги до матеріалів нагрівальних елементів

Непрямий (елементний) нагрів опором - це перетворення електричної енергії в теплоту у спеціальному нагрівальному елементі з наступною передачею

теплоти матеріалу, що нагрівається, через теплообмін. Матеріал при цьому може бути будь-яким - провідним або непровідним. Це принципова відмінність від прямого нагріву: предмет не є частиною електричного кола. Саме тому непрямий нагрів є найбільш масово застосовуваним в АПК: на ньому засновані всі ТЕН-водонагрівачі, калорифери, інкубатори, підлогові обігрівачі та ґрунтові системи теплиць.

Нагрівальний елемент - серце будь-якої елементної установки. Від його надійності залежить весь ресурс обладнання. Матеріал елемента повинен одночасно задовольняти кільком жорстким вимогам. Жаростійкість - здатність не окислюватися при тривалій роботі за високої температури: окалина, що утворюється на поверхні, порушує теплообмін і пришвидшує руйнування. Жароміцність - збереження механічної міцності при робочій температурі: нагрівач не повинен провисати, деформуватись чи руйнуватись під власною вагою. Великий питомий електричний опір - щоб нагрівач потрібної потужності мав компактні розміри і міг бути підключений безпосередньо до стандартної мережі 220/380 В без понижувального трансформатора. Малий температурний коефіцієнт опору - щоб потужність установки суттєво не змінювалася при розігріві від холодного стану до робочої температури. Стабільність властивостей - опір матеріалу не повинен зростати з часом (старіти), бо це поступово знижує потужність установки нижче проектної.

2. Матеріали нагрівальних елементів: ніхроми, фехралі, сталь

Хромонікелеві сплави - ніхроми - найповніше відповідають усім вимогам і є основним матеріалом для нагрівальних елементів. Подвійний ніхром Х20Н80 (80 % нікелю, 20 % хрому) має питомий опір $\rho = 1,0-1,1$ мкОм·м, малий температурний коефіцієнт опору та максимальну робочу температуру 1100 °С. Потрійний ніхром Х15Н60 містить залізо замість частини нікелю, що здешевлює матеріал при незначному зниженні робочої температури до 950 °С. Для установок АПК з робочою температурою до 400–600 °С (калорифери, водонагрівачі, інкубатори) цілком придатні дешевші сплави Х25Н20 і Х23Н18.

Важлива практична деталь: чим більше нікелю у сплаві, тим вище жароміцність і стабільність опору, але тим дорожчий матеріал.

Хромоалюмінієві сплави - фехралі - дешевші за ніхроми, але поступаються їм за жароміцністю при підвищених температурах і є складнішими в механічній обробці. Сплав X13Ю4 (13 % хрому, 4 % алюмінію, решта - залізо) застосовують для нагрівачів з робочою температурою до 700 °С. Хромонікельалюмінієвий сплав X15Н60Ю3А поєднує переваги обох груп: робоча температура до 1100 °С при нижчій вартості, ніж у X20Н80, завдяки зменшеному вмісту нікелю за рахунок алюмінію.

Конструкційна сталь є найдешевшим матеріалом і широко застосовується в низькотемпературних установках з робочою температурою 300–400 °С. Її суттєвий недолік - великий температурний коефіцієнт опору: потужність установки при розігріві помітно змінюється. Тому сталеві нагрівачі придатні лише там, де точна стабілізація температури не вимагається. При температурі вище 400 °С сталь інтенсивно окислюється, що різко скорочує ресурс нагрівача.

Для установок із робочою температурою вище 1250 °С - плавки металів, спікання кераміки - використовують неметалічні нагрівачі: карборунд (SiC), дисилікід молібдену (MoSi₂), графіт або тугоплавкі метали (вольфрам, тантал). В АПК такі матеріали не застосовуються - тут практично всі процеси є низькотемпературними (до 300–400 °С).

3. Конструктивні виконання нагрівачів: відкриті, закриті, герметичні (ТЕНи)

За конструктивним виконанням нагрівальні елементи поділяють на відкриті, закриті та герметичні. Відкриті нагрівачі - дріт або стрічка зі сплаву, скручені в спіраль або вигнуті зигзагом і закріплені на керамічних жароміцних ізоляторах. Теплота від них передається конвекцією і інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням. Чим вища температура нагрівача, тим більша частка енергії передається саме випромінюванням. Відкриті нагрівачі прості і дешеві, але вимагають захисту від механічних пошкоджень і можуть бути небезпечними при

дотику. Закриті нагрівачі - нагрівальний елемент у захисному кожусі. Теплота передається переважно конвекцією. Застосовуються там, де є ризик механічного пошкодження елемента.

Герметичні нагрівальні елементи - трубчасті електронагрівачі (ТЕНи) - є основним типом нагрівачів у сільськогосподарських електротермічних установках. ТЕН являє собою тонкостінну металеву трубку-оболонку, в яку запресована нагрівальна спіраль з ніхромового або фехралевого дроту. Простір між спіраллю і оболонкою заповнений периклазом - кристалічним оксидом магнію MgO, який одночасно є добрим електроізолятором і добре проводить тепло. Кінці спіралі з'єднані з контактними стрижнями, що виходять назовні через ізолятори і герметизовані термовологостійким лаком.

Матеріал оболонки визначає область застосування ТЕНа. Оболонка з вуглецевої сталі - для нагріву сухого повітря і мінеральних масел при температурі поверхні до 400–450 °С. Оболонка з нержавіючої сталі - для агресивних середовищ і температур оболонки вище 450 °С. Мідна оболонка (нерідко лужена або нікельована) - для нагріву питної води і харчових рідин: мідь забезпечує кращу тепловіддачу і не утворює токсичних оксидів. Ребриста конструкція ТЕНа (алюмінієві або мідні ребра, напресовані на оболонку) збільшує площу тепловіддачі в 3–5 разів і застосовується в повітряних калориферах для зменшення габаритів установки.

Основний параметр ТЕНа - питома поверхнева потужність $PF = P/(\pi \cdot D \cdot l_a)$ (Вт/см²), де D - зовнішній діаметр (см), l_a - активна довжина (см). Допустима PF залежить від умов роботи: при нагріві повітря у вільній конвекції - не більше 2 Вт/см², при примусовій конвекції повітря - до 4 Вт/см², у нерухомій воді - до 7 Вт/см², у проточній воді - до 11 Вт/см². Перевищення допустимого значення PF призводить до перегріву периклазу і спіралі, що різко скорочує ресурс ТЕНа або спричиняє миттєвий пробій.

Кількість ТЕНів в установці: $n = R_{уст}/P_1$, де $R_{уст}$ - встановлена потужність (Вт), P_1 - номінальна потужність одного ТЕНа. Для рівномірного навантаження трифазної мережі n має бути кратним трьом. Маркування ТЕНа, наприклад ТЕН-

100A12,5/2,0У220, розшифровується так: ТЕН - трубчастий електронагрівач, 100 - розгорнута довжина (см), А - умовне позначення виводів, 12,5 - зовнішній діаметр оболонки (мм), 2,0 - номінальна потужність (кВт), У - середовище (вода), 220 - напруга живлення (В).

4. Розрахунок нагрівального елемента: переріз, довжина, температура поверхні

Мета електричного розрахунку нагрівального елемента - визначення діаметра дроту (або розмірів стрічки) і необхідної довжини нагрівача. Вихідні дані: потужність одного нагрівача P_n (Вт), напруга живлення U (В), умови роботи (вид середовища). Розрахунок ґрунтується на двох рівняннях, що описують нагрівач одночасно як елемент електричного кола і як тіло, що обмінюється теплотою з середовищем.

З електричної сторони: потужність нагрівача $P_n = U^2/R_n$, звідки опір нагрівача $R_n = U^2/P_n$ (Ом). Водночас $R_n = \rho \cdot l/S$, де ρ - питомий опір матеріалу при робочій температурі (Ом·м), l - довжина (м), S - площа перерізу (m^2). З теплової сторони: у стаціонарному режимі вся потужність P_n передається через бічну поверхню в навколишнє середовище. Питома поверхнева потужність $\omega F = P_n/F$, де F - площа бічної поверхні (m^2). Для дротового нагрівача $F = \pi \cdot d \cdot l$ (m^2), тому $\omega F = P_n/(\pi \cdot d \cdot l)$.

Об'єднуючи обидва рівняння, отримуємо розрахунковий діаметр дроту нагрівача: $d = (4 \cdot \rho \cdot P_n^2 / (\pi^2 \cdot \omega F \cdot U^2))^{1/3}$, а розрахункова довжина: $l = U^2 \cdot \pi \cdot d / (4 \cdot \rho \cdot P_n)$. За значенням d підбирають найближчий більший стандартний діаметр з сортаменту ніхромового дроту, після чого перераховують довжину. Для стрічкового нагрівача замість d використовують розміри a (товщина) і b (ширина): периметр перерізу $\Pi = 2 \cdot (a + b)$, а площа $S = a \cdot b$. Якщо задати співвідношення $m = b/a$, система рівнянь дає розрахункову товщину стрічки. Важливе обмеження: при робочій температурі вище $700^\circ C$ не рекомендується застосовувати дріт діаметром менше 5 мм і стрічку товщиною менше 1,5 мм - тонкі перерізи при окисленні матеріалу швидко руйнуються.

Температура поверхні нагрівача траб завжди вища за температуру матеріалу, що нагрівається тм: різниця визначається опором теплопередачі між нагрівачем і матеріалом. Для відкритих нагрівачів у нерухомому повітрі: $траб = трозр$, де $трозр$ - розрахункова температура нагрівача. Фактична траб залежить від способу монтажу і середовища: для спіралі в повітрі коефіцієнт монтажу $k_m = 0,8-0,9$ (умови охолодження гірші, ніж у вільно підвішеного дроту); для нагрівача, укладеного в ґрунт або під підлогу, $k_m = 0,3-0,4$. Коефіцієнт середовища k_c враховує покращення охолодження: в потоці повітря $k_c = 1,1-1,5$, у нерухомій воді $k_c = 2,5$, у проточній воді $k_c = 3,0-3,5$. Розрахункова температура, за якою визначають діаметр дроту: $трозр = траб \cdot k_m / k_c \leq t_{max}$, де t_{max} - максимально допустима температура для матеріалу нагрівача.

5. Нагрівальні дроти і кабелі: типи, допустима питома потужність, розрахунок

Нагрівальні дроти і кабелі є різновидом елементних нагрівачів для розподіленого обігріву протяжних поверхонь - ґрунту теплиць і парників, підлоги тваринницьких і птахівницьких приміщень, водопровідних труб на введенні в будівлі. Їхня перевага перед ТЕНами - можливість вільного розкладання та згинання при монтажі. Недолік - нижча допустима питома потужність і менша робоча температура.

Дроти типу ПОСХП і ПОСХВ мають сталеву струмопровідну жилу і поліетиленову або ПВХ-ізоляцію. Вони призначені для обігріву ґрунту і підлоги при температурі середовища до 40 °С. Допустима питома погонна потужність для цих типів - близько 11 Вт/м. Дріт ПНВСВ підвищеної надійності, крім основної ізоляції, має фторопластову стрічку, екран зі сталевих дротиків (Ø 0,3 мм) і зовнішню ПВХ оболонку - все це збільшує термін служби в 4-5 разів. Допустима питома потужність для ПНВСВ - 16 Вт/м. Нагрівальні кабелі типу КНРПВ і КНРПЕВ мають одну або дві ніхромові жили, ізольовані зшитим поліетиленом і захищені ПВХ оболонкою. Розраховані на 220 В, стійкі до температур від -50 до +60 °С. Кабелі з нержавіючою оболонкою і магнезитовою

ізоляцією розраховані на температуру до 400 °С і зручніші за ТЕНи у складних геометріях монтажу.

У 2023–2025 рр. на ринку активно впроваджуються саморегулювальні нагрівальні кабелі, в яких провідна матриця з ПТК-полімеру (полімерний позитивний температурний коефіцієнт) автоматично знижує потужність при підвищенні температури і збільшує при охолодженні. Це унеможливорює перегрів будь-якої ділянки кабелю і дозволяє перетинати кабель без захисних заходів. Для систем обігріву ґрунту в теплицях саморегулювальний кабель дає економію електроенергії 20–35 % порівняно зі звичайним резистивним.

Розрахунок нагрівальної системи з дроту або кабелю виконується у такій послідовності. Задають робочу питому потужність $p_{\text{раб}} \leq p_{\text{доп}}$ (Вт/м). За технологічно необхідною загальною потужністю $P_{\text{уст}}$ знаходять загальну довжину нагрівача: $L = P_{\text{уст}}/p_{\text{раб}}$ (м). Напряга на 1 м нагрівача: $u_1 = \sqrt{(p_{\text{раб}} \cdot R_1)}$ (В), де R_1 - питомий опір дроту (Ом/м). Довжина однієї секції, підключеної до напруги U : $L_c = U/u_1$ (м). Кількість секцій: $n = L/L_c$. n повинно бути цілим і кратним трьом. Якщо це не виконується, підбирають нове значення $p_{\text{раб}}$ і повторюють розрахунок.

6. Схеми включення і регулювання потужності елементних нагрівачів

Регулювання потужності елементних нагрівачів необхідне для підтримання заданої температури в різних режимах роботи - від прогріву холодної установки до підтримання температури в стаціонарному режимі. Всі методи регулювання можна поділити на ступінчасті (перемикання схем) і плавні (зміна напруги).

Ступінчасте регулювання перемиканням схем - найпростіший і найнадійніший метод. При двох однакових нагрівальних секціях опором R_1H можна забезпечуються три ступені потужності. При паралельному включенні обох секцій загальний опір $R_{\text{пар}} = R_1H/2$ і потужність максимальна: $P_{\text{пар}} = U^2/R_{\text{пар}} = 2 \cdot U^2/R_1H$. При включенні однієї секції: $P_{\text{одн}} = U^2/R_1H$. При

послідовному включенні обох секцій $R_{\text{пос}} = 2 \cdot R_1 H$ і потужність мінімальна: $R_{\text{пос}} = U^2 / (2 \cdot R_1 H)$. Співвідношення потужностей: $R_{\text{пар}} : R_{\text{одн}} : R_{\text{пос}} = 2 : 1 : 0,5$. Діапазон регулювання складає 4:1. Для n однакових секцій загальний діапазон регулювання (паралельне / послідовне включення всіх) дорівнює n^2 .

Для трифазних установок використовується переключення схеми з'єднання зірка–трикутник. При з'єднанні в зірку напруга на кожному нагрівачі дорівнює фазній: $U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$. При з'єднанні в трикутник - лінійній: $U_{\text{л}}$. Оскільки потужність пропорційна квадрату напруги, відношення потужностей: $R_{\Delta} / R_{\text{зірка}} = (U_{\text{л}} / U_{\text{ф}})^2 = 3$. Тобто перемиканням зірка–трикутник отримуємо два ступені з відношенням 3:1. Поєднання перемикання зірка–трикутник з перемиканням послідовно–паралельно всередині кожної фази дозволяє збільшити кількість ступенів до 6–9, що достатньо для більшості практичних завдань АПК.

Плавне регулювання потужності здійснюється зміною напруги на нагрівачах. Традиційні методи - за допомогою автотрансформатора або реостата - малоефективні через власні втрати. В сучасних установках 2024–2026 рр. застосовуються тиристорні та симісторні регулятори (фазове управління) або ШІМ-регулятори на IGBT-ключах. Фазове управління тиристором зрізає частину напівхвилі синусоїди, ефективно знижуючи діюче значення напруги на нагрівачі. Метод простий, але генерує вищі гармоніки в мережі, що вимагає фільтрів у потужних установках (понад 10 кВт). ШІМ-регулятори вмикають і вимикають нагрівач з частотою 50–400 Гц, змінюючи шпаруватість імпульсів. Це забезпечує точне і плавне регулювання без спотворення форми напруги в мережі. Точність підтримання температури при тиристорному або ШІМ-управлінні в комбінації з ПІД-регулятором досягає $\pm 0,5$ – $1,0$ °С - це більш ніж достатньо для всіх теплових процесів АПК.

Вибір методу регулювання визначається технологічними вимогами і вартістю обладнання. Для теплиць, інкубаторів і пастеризаційних установок, де точність температури критична, доцільне тиристорне або ШІМ-управління. Для водонагрівачів і калориферів, де достатня точність ± 2 – 5 °С, економічно виправданим є ступінчасте перемикання у поєднанні з двопозиційним

терморегулятором (увімкнено/вимкнено). Важливий технічний аспект: при ступінчастому перемиканні нагрівачів необхідно забезпечити рівномірне навантаження всіх трьох фаз - кількість нагрівачів у кожній схемі підключення повинна бути кратною трьом.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У чому принципова відмінність непрямого нагріву від прямого? Чому непрямий нагрів є найбільш поширеним у сільськогосподарському виробництві?

2. Назвіть п'ять основних вимог до матеріалів нагрівальних елементів. Поясніть, чому кожна з цих вимог є важливою для надійної роботи установки.

3. Порівняйте ніхром Х20Н80 і фехраль Х13Ю4 за максимальною робочою температурою, питомим опором та механічними властивостями. Для яких умов роботи кожен з них є оптимальним?

4. Опишіть конструкцію ТЕНа. Яка роль периклазу як наповнювача? Чому оболонку ТЕНа виготовляють з різних матеріалів залежно від середовища нагрівання?

5. Що таке питома поверхнева потужність ТЕНа і як вона розраховується? Порівняйте допустимі значення R_F при нагріві повітря у вільній конвекції та у проточній воді. Чим пояснюється така різниця?

6. Запишіть формулу для розрахунку діаметра дротового нагрівального елемента. Як зміниться розрахунковий діаметр, якщо знизити напругу живлення вдвічі при тих самих потужності та питомій потужності?

7. Що таке коефіцієнт монтажу k_m і коефіцієнт середовища k_c ? Чому нагрівач, укладений у ґрунт, має значно менший k_m , ніж той самий нагрівач, підвішений у повітрі?

8. В чому відмінність нагрівального дроту ПОСХВ від ПНВСВ? Яка допустима питома погонна потужність для кожного? Де саме застосовуються саморегулювальні кабелі і в чому їхня перевага?

9. Опишіть три ступені потужності при регулюванні перемиканням двох однакових нагрівальних секцій. Яке співвідношення потужностей і діапазон регулювання?

10. Чому при переключенні трифазних нагрівачів зі зірки на трикутник потужність зростає в три рази? Які сучасні методи плавного регулювання потужності застосовуються в установках АПК і яка точність підтримання температури при ПД-управлінні?

Лекція 1.5

Тема: «Електричні водонагрівники»

ПЛАН

1. Класифікація електричних водонагрівників. Потреба в гарячій воді в АПК
2. Елементні водонагрівники: конструкція, режими роботи, переваги та недоліки
3. Вибір і розрахунок елементних водонагрівників
4. Електродні водонагрівники: принцип дії, типи електродних систем
5. Розрахунок електродного водонагрівника. Типи установок КЕВ та ЕПЗ
6. Вимоги електробезпеки при експлуатації електроводонагрівників

1. Класифікація електричних водонагрівників. Потреба в гарячій воді в АПК

Електричні водонагрівники є найпоширенішим видом технологічного електрообладнання в АПК. Гаряча вода необхідна для напування худоби (підігріта до 12–20 °С), миття молочного обладнання (55–65 °С), пастеризації молока (72–76 °С), санітарної обробки приміщень, обігріву підлоги та теплиць. Норми споживання гарячої води суттєво відрізняються залежно від виду тварин: дійна корова потребує 65 л/добу для напування і 15 л/добу гарячої води для миття обладнання; свиноматка з приплодом - 40 л/добу; телята і молодняк - 13 л/добу. Своєчасне і якісне теплове водопостачання безпосередньо впливає на продуктивність тваринництва.

За принципом нагрівання розрізняють два типи електроводонагрівників. В елементних теплота виділяється в трубчастих нагрівальних елементах (ТЕНах), а відтак передається воді через стінку оболонки. Нагрівана вода безпосередньо з

електричним струмом не контактує. В електродних нагрівниках вода є провідником другого роду і нагрівається безпосередньо при проходженні через неї електричного струму між електродами. За режимом роботи обидва типи поділяють на проточні (безперервної дії), де вода нагрівається в процесі руху через апарат, і непроточні, або акумуляційні, де весь об'єм води нагрівається в баку і зберігається до використання. Акумуляційні нагрівники можуть вмикатися у нічний час (тариф на електроенергію 2024–2026 рр. в Україні вночі на 50–60 % нижчий за денний), що суттєво знижує витрати.

За напругою живлення водонагрівники поділяють на низьковольтні (до 1 кВ, зазвичай 380 В) і високовольтні (6 або 10 кВ). Низьковольтні встановлюють безпосередньо на фермах, а високовольтні (потужністю від 2500 до 10 000 кВт) - у котельнях для централізованого тепlopостачання великих тваринницьких комплексів.

2. Елементні водонагрівники: конструкція, режими роботи, переваги та недоліки

Елементний водонагрівник складається з герметичного бака, всередині якого розміщені один або кілька ТЕНів, патрубків підведення холодної і відведення гарячої води, датчиків температури і арматури безпеки. В непроточних установках (бойлерах) вся вода знаходиться в баку і нагрівається від встановлених ТЕНів. Після досягнення заданої температури терморегулятор вимикає нагрівачі, і вода зберігається під шаром теплоізоляції. Проточні елементні нагрівники мають малий об'єм і потужні ТЕНи: вода нагрівається безпосередньо в потоці. Їхня встановлена потужність для нагріву на 40–50 °С при витраті 2–3 л/хв становить 5–10 кВт.

Принципово важливе обмеження: ТЕНи елементного водонагрівника ні в якому разі не можна вмикати без води у баку або при порушенні циркуляції. Без відведення теплоти через воду температура оболонки ТЕНа стрімко зростає, вигорає наповнювач-периклаз, порушується ізоляція спіралі і відбувається

пробій. Захист від сухого ходу - обов'язковий елемент схеми управління будь-якого елементного водонагрівника.

Перевагами елементних водонагрівників є незалежність споживаної потужності від питомого електричного опору води, що спрощує налагодження та експлуатацію. Вода, нагріта ТЕНами, придатна для прямого напування тварин та харчових потреб без додаткової підготовки. При несправності одного ТЕНа установка може продовжувати роботу зі зниженою потужністю, а заміна ТЕНа є відносно нескладною операцією. Питома металоємність елементних нагрівників становить 10–25 кг/кВт, що в 5–10 разів більше, ніж у електродних.

Серед недоліків: порівняно низький ККД (0,85–0,95) через теплові втрати через стінки бака; можливість відкладання накипу на поверхні ТЕНів, що погіршує теплообмін і прискорює старіння; заборона роботи при неповнофазному режимі; необхідність ізолюючих вставок у трубопроводах для запобігання появі небезпечного потенціалу на корпусі при замиканні на землю.

3. Вибір і розрахунок елементних водонагрівників

Розрахунок потрібної потужності елементного водонагрівника виконується за таким алгоритмом. Добова потреба у гарячій воді визначається з норм споживання для кожного виду тварин: $Q_{\text{доб}} = a \cdot N$ (дм³/добу), де a - добова норма на одну голову (дм³/добу), N - кількість голів. Для врахування нерівномірності споживання вводять коефіцієнти: $k_{\text{доб}} = 1,2–1,3$ (добова нерівномірність) та $k_{\text{год}} = 1,6–2,0$ (годинна нерівномірність).

Розрахункова потужність водонагрівника, кВт: $P = k_{\text{доб}} \cdot k_{\text{год}} \cdot a \cdot c \cdot N \cdot (\theta_{\text{гар}} - \theta_{\text{хол}}) / (3600 \cdot 24 \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{м}})$, де $c = 4,19$ кДж/(кг·°С) - питома теплоємність води, $\theta_{\text{гар}}$ і $\theta_{\text{хол}}$ - температури гарячої та холодної води (°С), $\eta_{\text{в}} = 0,85–0,95$ - ККД водонагрівника, $\eta_{\text{м}} = 0,80–0,90$ - ККД теплової мережі. Наприклад, для корівника на 240 голів при $\theta_{\text{хол}} = 8$ °С, $\theta_{\text{гар}} = 12$ °С і норми 65 л/добу розрахункова потужність становить близько 9,6 кВт; обирають стандартну установку ВЕП-600 потужністю 10 кВт.

При виборі водонагрівника за каталогом перевіряють відповідність номінальної потужності розрахунковій, допустимий діапазон питомого опору води (зазвичай 10–80 Ом·м для елементних), максимальний тиск і температуру. Важливо, що у непроточних установках час нагрівання одного об'єму $\tau = V \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1) / (P \cdot \eta)$, тому ємність бака V повинна бути достатньою для покриття пікового попиту без безперервної роботи. Сучасні акумуляційні водонагрівники об'ємом 100–1000 л з посиленою пінополіуретановою теплоізоляцією зберігають нагріту воду до 24 годин зі втратами температури 3–5 °С/добу, що дозволяє ефективно використовувати нічний тариф.

4. Електродні водонагрівники: принцип дії, типи електродних систем

Електродний водонагрівник - це установка прямого нагрівання, в якій вода між електродами слугує провідником другого роду. При проходженні електричного струму через воду за законом Ленца–Джоуля в ній виділяється теплота. Оскільки теплота виділяється рівномірно по всьому об'єму між електродами, ефективність передачі енергії надзвичайно висока: ККД електродних нагрівників досягає 0,97–0,99. Важливо: застосовують виключно змінний струм, оскільки постійний струм спричиняє електроліз, руйнування електродів та забруднення води продуктами корозії.

За конфігурацією електродних систем розрізняють плоску, трифазну пластинчасту і коаксіальну циліндричну конструкції. Плоска система з двох паралельних пластин застосовується в однофазних нагрівниках потужністю до 10 кВт. Трифазна система з трьома пластинами, вигнутими під кутом 120° одна до одної, або з рамковими електродами, забезпечує симетричне трифазне навантаження і є основною для потужності 10–250 кВт. Коаксіальна циліндрична система - фазний і нульовий електроди у вигляді концентричних циліндрів - застосовується при потужностях понад 250 кВт, а також для живлення напругою 6 або 10 кВ, де плоскі електроди не забезпечують достатньої міжелектродної відстані.

Матеріали електродів вибирають з умови стійкості до корозії в електричному полі. Найкращими є титан і нержавіюча сталь (марки 12Х18Н10Т) - вони не утворюють токсичних оксидів. Термін служби електродів з нержавіючої сталі - 7–9 років. Термін служби ТЕНів у порівнянних умовах - 5–8 років.

Потужність електродного нагрівника суттєво залежить від питомого електричного опору води ρ_{20} (Ом·м при 20 °С). Нормативне значення для більшості установок: $\rho_{20} = 10\text{--}80$ Ом·м. Якщо ρ_{20} більший за норму (вода надто чиста або дистильована) - потужність буде нижчою за номінал; якщо менший (засолена вода) - перевищить номінал, що може призвести до перевантаження мережі та перевищення щільності струму на електродах. Підбір якості води - не менш важлива задача, ніж розрахунок самого нагрівача.

5. Розрахунок електродного водонагрівника. Типи установок КЕВ та ЕПЗ

Розрахунок електродного проточного водонагрівника виконується в такій послідовності. Розрахункова потужність, кВт: $P = k_z \cdot G \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1) / 3600$, де G - масова продуктивність (кг/год), $c = 4,19$ кДж/(кг·°С), θ_1 і θ_2 - температури на вході і виході (°С), $k_z = 1,05\text{--}1,2$ - коефіцієнт запасу. Відстань між електродами визначають з умови допустимої напруженості поля: $l = U/E_{\text{доп}}$, де $E_{\text{доп}} = 125\text{--}250$ В/см (менші значення для меншого ρ_{20}). При $U = 380$ В і $E_{\text{доп}} = 150$ В/см відстань $l \approx 2,5$ см. Висоту пластинчастого електрода знаходять із формули $h = 40 \cdot K \cdot P \cdot c \cdot \rho_{20} / (3 \cdot U_{\text{ф}}^2 \cdot (\rho_{20} + \theta_{\text{с}}))$, де K - геометричний коефіцієнт електродної системи, $\theta_{\text{с}}$ - середня температура нагрівання. Розрахунок завершують перевіркою щільності струму на електродах - вона не повинна перевищувати $j_{\text{доп}} = 0,5$ А/см² для плоских та 1,0 А/см² для циліндричних електродів.

Котли електродні водогрійні КЕВ виготовляються на напругу 0,4; 6 та 10 кВ потужністю від 9 до 1000 кВт (низька напруга) та 2500–10 000 кВт (висока напруга). Робоча температура на виході - 95 °С, на вході - 70 °С. Діапазон регулювання потужності для більшості моделей - 25–100 % від номінальної, що досягається

переміщенням діелектричних екранів у міжелектродному просторі. Металоємність 1–3 кг/кВт проти 10–25 кг/кВт у елементних - принципова конструктивна перевага.

Електродний водонагрівник ЕПЗ-100 потужністю 100 кВт і напругою 380 В має коаксіальну триелектродну систему. Три електродні групи з'єднані за схемою 'зірка'. Регулювання потужності від 25 до 100 % здійснюється маховиком через ходовий гвинт, який переміщує ізоляційні циліндричні екрани зі склотекстоліту між електродами: при опусканні екранів активна площа зменшується і потужність падає. ККД установки - 0,99. Захист реалізовано: температурний захист з двома рівнями - регульовальним (вимикання нагрівача при досягненні номінальної температури) і аварійним (вимикання при перевищенні максимальної допустимої); блокування від роботи без циркуляції (допоміжні контакти автоматичного вимикача насоса в колі управління); захист від несиметричного навантаження при пропаданні фази (струмове реле в нульовому проводі).

Сучасна тенденція 2024–2026 рр. - переведення великих тваринницьких комплексів з газових котелень на електродні котли КЕВ у зв'язку з ненадійністю газопостачання в Україні. Низьковольтні КЕВ потужністю 40–250 кВт дозволяють безпосередньо підключатися до трифазної мережі 0,4 кВ без додаткових понижувальних трансформаторів, що суттєво спрощує монтаж. Доцільно поєднувати роботу електродних котлів з тепловими акумуляторами об'ємом 5–20 м³, які накопичують тепло в нічні години низького тарифу і віддають його вдень - це дозволяє скоротити пікове навантаження і знизити витрати на електроенергію на 30–40 %.

6. Вимоги електробезпеки при експлуатації електроводонагрівників

До обслуговування електроводонагрівників допускаються електромонтери з групою допуску з електробезпеки не нижче третьої (для обладнання до 1000 В). Перед початком роботи необхідно переконатися у відсутності напруги на корпусі

нагрівача за допомогою покажчика напруги. Всі операції регулювання та технічного обслуговування виконуються лише за знятої напруги.

Захист людей і тварин від ураження електричним струмом забезпечується комплексом заходів. Корпус водонагрівника напругою до 1000 В і всі металеві частини, що можуть опинитися під напругою, приєднуються до нульового проводу. Нульовий провід повторно заземлюється на введенні в приміщення. Однак для нагрівачів у тваринницьких приміщеннях з підвищеною небезпекою в мережах 380 В з глухозаземленою нейтраллю корпус нагрівача, навпаки, ізолюють від землі і огорожують металевою сіткою висотою не менше 1,7 м, надійно приєднаною до нульового проводу. Це пов'язано з тим, що при пошкодженні ізоляції у нульовому проводі на корпусі нагрівача може виникнути небезпечний потенціал.

Трубопроводи холодної і гарячої води, що виходять від електроводонагрівника, приєднуються через ізолюючі діелектричні вставки довжиною не менше 1 м - це запобігає появі небезпечного потенціалу на металевих трубах водопроводу поза зоною огорожі нагрівача. При пошкодженні фазного проводу і замиканні на корпус нагрівника без ізолюючих вставок потенціал поширювався б металевими трубами по всьому будівлі, створюючи небезпеку кругового ураження.

Потужність електродних нагрівників не повинна перевищувати номінальну. Основна умова: питомий електричний опір води ρ_{20} повинен відповідати паспортному діапазону нагрівача. При заниженому ρ_{20} струм зростає, перевантажуючи мережу і прискорюючи електрохімічне руйнування електродів. Регулярне вимірювання ρ_{20} кондуктометром є обов'язковим регламентним заходом для персоналу. У разі відхилення ρ_{20} від норми - доповнення пом'якшувачем або добавка солей відповідно до рекомендацій підприємства-виробника. Заборонено застосування в установках з дозволом лише заводського виготовлення.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. За якими ознаками класифікуються електричні водонагрівники? Порівняйте проточний і акумуляційний типи за призначенням, встановленою потужністю та можливістю роботи на нічному тарифі.

2. Назвіть норми добового споживання гарячої та питної води для дійної корови, свиноматки з приплодом та телят. Як ці показники використовуються при розрахунку потрібної потужності водонагрівника?

3. Запишіть формулу для розрахунку потрібної потужності елементного водонагрівника. Що враховують коефіцієнти добової та годинної нерівномірності? Чому в розрахунку є два ККД - нагрівника і теплової мережі?

4. Чому вмикання елементного водонагрівника без води або при зупиненій циркуляції призводить до виходу з ладу ТЕНів? Яким чином реалізується захист від «сухого ходу»?

5. У чому суть електродного нагрівання води? Чому застосовують виключно змінний струм? Що відбувається при використанні постійного струму?

6. Назвіть три основні конструктивні типи електродних систем і вкажіть, для яких потужностей і умов кожен з них є оптимальним. Яким матеріалам електродів надається перевага і чому?

7. Яким чином питомий електричний опір води ρ_{20} впливає на потужність електродного нагрівника? Що станеться, якщо ρ_{20} буде значно нижчим за паспортне значення?

8. Опишіть конструкцію і принцип роботи електродного водонагрівача ЕПЗ-100. Яким способом регулюється його потужність у діапазоні 25–100 %? Які захисти передбачені у схемі управління?

9. Порівняйте ККД, металоемність і типові сфери застосування елементних (ТЕН) і електродних водонагрівників в АПК. У яких умовах кожен з них є більш доцільним рішенням?

10. Чому у тваринницьких приміщеннях корпус електродного водонагрівника ізолюють від землі і огорожують сіткою, а не приєднують до

нульового проводу, як це зазвичай робиться? Яка небезпека виникає без ізолюючих вставок на трубопроводах?

Лекція 1.6

Тема: «Електротермічне обладнання систем мікроклімату в спорудах захищеного ґрунту»

ПЛАН

1. Агротехнічні вимоги до мікроклімату споруд захищеного ґрунту
2. Способи електрообігрівання: ґрунтовий, повітряний, комбінований
3. Нагрівальні елементи для обігріву ґрунту. Типи і порівняльний аналіз
4. Електрокалориферне обладнання для повітряного обігріву теплиць
5. Розрахунок потужності обігрівальних установок парників і теплиць
6. Автоматизація мікроклімату. Електробезпека в спорудах захищеного ґрунту

1. Агротехнічні вимоги до мікроклімату споруд захищеного ґрунту

До споруд захищеного ґрунту відносяться парники, весняні й зимові теплиці та оранжереї. Їх основна функція - забезпечити рослинам сприятливий мікроклімат в умовах, коли природні температурні умови для цього є несприятливими, передусім у зимово-весняний сезон. У контексті воєнного часу 2022–2025 рр. та економічних викликів в Україні вирощування продукції захищеного ґрунту набуло особливої стратегічної ваги: теплиці та парники дозволяють отримувати ранній урожай овочів незалежно від зовнішніх умов і скорочують залежність від імпорту.

Визначальним параметром мікроклімату захищеного ґрунту є температура повітря. Залежно від вирощуваної культури оптимальні значення суттєво різняться: для розсади капусти - 14–18 °С, для огірків - 20–25 °С, для томатів - 18–22 °С. Не менш важливою є температура ґрунту, адже саме від неї залежить активність кореневої системи. Температурний перепад між ґрунтом і повітрям не має перевищувати 3–5 °С. При цьому вдень повітря повинно прогріватися

більше, ніж ґрунт, а вночі - навпаки: підтримання температури ґрунту вище за температуру повітря запобігає переохолодженню коренів і стимулює ріст.

Норми технологічного проектування регламентують точність підтримання температурного режиму: відхилення температури ґрунту не більше ± 1 °С, повітря - не більше ± 2 °С. Такі жорсткі допуски неможливо витримати без автоматичного регулювання. Практика показує, що без автоматики втрати врожайності через температурні відхилення досягають 20–30 %, а в окремих культур - до 50 %.

2. Способи електрообігрівання: ґрунтовий, повітряний, комбінований

Існують три основні способи електрообігрівання споруд захищеного ґрунту: ґрунтовий, повітряний та комбінований (ґрунтово-повітряний). Вибір способу визначається строком введення споруди в експлуатацію, конструктивними особливостями і техніко-економічними міркуваннями.

Ґрунтовий спосіб передбачає розміщення нагрівальних елементів безпосередньо в шарі ґрунту. Він забезпечує найбільш рівномірне прогрівання кореневої системи рослин і відзначається найменшою енергомісткістю - завдяки значній теплоакумуючій здатності ґрунту система здатна переносити перерви в електропостачанні без критичних наслідків для рослин. Питома встановлена потужність при ґрунтовому обігріванні: 60–80 Вт/м² площі теплиці для ранніх строків (березень).

Повітряний спосіб полягає у подачі підігрітого електрокалорифером повітря в простір теплиці або парника. Порівняно з ґрунтовим він потребує приблизно на 50 % більше електроенергії на той самий температурний ефект, оскільки повітря має значно меншу теплоємність і теплоакумуючу здатність, ніж ґрунт. Ґрунт при повітряному обігріванні прогрівається повільно. Проте цей спосіб потребує менших капітальних витрат на будівництво та монтаж, тому його рекомендують при середніх і пізніх строках введення в експлуатацію (з кінця березня), коли критичних весняних заморозків вже практично немає. Питома встановлена потужність - 70–100 Вт/м².

Комбінований (грунтово-повітряний) спосіб поєднує переваги обох попередніх: забезпечує одночасне підтримання оптимальної температури і ґрунту, і повітря, а отже - найкращі умови для рослин у найбільш ранні строки (початок березня або лютий для зимових теплиць). Розрахункову потужність у цьому випадку розподіляють між нагрівними елементами ґрунту й повітря у співвідношенні 1:1 або 1:2. Недоліком є найвищі капітальні витрати.

3. Нагрівальні елементи для обігріву ґрунту. Типи і порівняльний аналіз

Для ґрунтового обігрівання парників і теплиць застосовують такі нагрівні елементи: нагрівні проводи ПОСХВ, ПОСХП і ПОСХВТ; сталевий оцинкований дріт діаметром 2–3 мм в ізоляційних (азбестоцементних або гончарних) трубах; неізольований сталевий дріт діаметром 5–7 мм, прокладений у шарі піску при зниженій напрузі живлення 50 В; асфальтобетонні блоки з вбудованими нагрівальними елементами.

Нагрівні проводи ПОСХВ (з поліетиленою ізоляцією), ПОСХП (з полівінілхлоридною) і ПОСХВТ (теплостійкий, до +90 °С) є найбільш поширеним рішенням для сучасних теплиць. Погонна питома потужність - 9–13 Вт/м для ПОСХП та 9–10 Вт/м для ПОСХВ. Проводи прокладають у шарі ґрунту на глибині 300 мм смугами шириною 400 мм, а поверх них заливають шар цементно-піщаного розчину товщиною 40–50 мм. Для захисту від механічних пошкоджень і додаткового заходу електробезпеки над проводом на відстані 50 мм укладають заземлену металеву сітку з вічками 30–50 мм. У середні обігрівні смуги теплиці вкладають по два відрізки проводу, у крайні - по три, що компенсує підвищені теплові втрати біля бокових стін.

Сталевий дріт в ізоляційних трубах застосовується у парниках. Труби ґрунтового обігріву прокладають з нахилом 0,002–0,003. Для підвищення ізоляційних властивостей азбестоцементні труби просочують у гарячому бітумі або трансформаторному маслі, а місця з'єднань промазують цементним

розчином. Перевагою є легкість заміни нагрівального дроту при перегоранні; недоліком - значна витрата труб і втрата до 20 % корисної площі парника.

Неізолюваний сталевий дріт при живленні зниженою напругою 50 В має термін служби 8–10 років і відзначається дуже рівномірним температурним полем. Проте вимагає встановлення знижувальних трансформаторів і значно ускладнює заміну перегорілого елемента. Несталість електричних властивостей сталевого дроту і залежність електропровідності ґрунту від вологості ускладнюють точний розрахунок і регулювання температурного режиму. Цей спосіб технічно застарів і практично не застосовується в нових установках.

Для повітряного обігрівання у парниках нагрівний провід підвішують до натягнутого вздовж парника сталевого дроту на відстані 20–30 мм від патрубків рами - саме у верхній зоні простору, де необхідно підтримувати температуру повітря. Кроком укладання нагрівальних елементів регулюють рівномірність теплового поля: крок поблизу торців зменшують до 50 мм (компенсація підвищених крайових втрат), у середині - збільшують до 130 мм.

4. Електрокалориферне обладнання для повітряного обігріву теплиць

Електрокалориферна установка (ЕКУ) складається з вентилятора (осьового або відцентрового), електрокалорифера та шафи керування. Електрокалорифер - це блок нагрівних елементів у металевому корпусі, температура нагрівання ТЕНів або спіралей у якому досягає 180 °С. У сучасних конструкціях широко застосовують ТЕНи з алюмінієвим оребрением, намотаним на ребро: це суттєво збільшує поверхню тепловіддачі при незмінних габаритах. Обов'язкова умова правильного монтажу: електрокалорифер встановлюють з боку всмоктування вентилятора (тобто вентилятор засмоктує повітря через калорифер, а не видуває через нього). При цьому конструкція забезпечує рівномірне обтікання всіх нагрівних елементів повітряним потоком, а температура поверхні ТЕНів не перевищує допустиму.

У вентиляційно-опалювальних системах теплиць застосовують уніфіковані електрокалориферні установки серії СФОЦ (відцентровий

вентилятор) і СФОО (осьовий). Розшифровка маркування СФОЦ: С - нагрів опором; Ф - електрокалорифер; О - окислювальна атмосфера (сільськогосподарське виконання); Ц - відцентровий вентилятор; цифри - приблизна потужність установки в кВт і закруглена температура повітря на виході. Агрегати СФОЦ-16/0,5 і СФОЦ-25/0,5 призначені для повітропроводів завдовжки до 20 м, потужніші СФОЦ-40, СФОЦ-60, СФОЦ-100 - до 40 м.

У теплиці площею 500–1000 м² для рівномірного розподілу підігрітого повітря від центрально розташованого калорифера використовують два перфорованих поліетиленових повітропроводи. Вздовж кожного з них виконують два ряди отворів діаметром 5 см з кроком 1 м; кінці повітропроводів заглушені. Така конструкція «рукавів» забезпечує рівномірне подання теплого повітря по всій довжині теплиці без перегріву центральних зон і переохолодження торцевих.

Принципова електрична схема ЕКУ серії СФОЦ-25 реалізує трисекційне регулювання потужності: три секції ТЕНів підключаються незалежно один від одного через електромагнітні пускачі КМ1–КМ3, що дозволяє ступінчасто регулювати потужність на рівнях 33 %, 66 % та 100 % від номінальної. Ключовим захистом є блокування від роботи без потоку повітря: замикаючий допоміжний контакт автоматичного вимикача електродвигуна вентилятора у колі пускачів секцій ТЕНів не дозволяє ввімкнути нагрівники при непрацюючому вентиляторі - без обдування температура ТЕНів перевищить допустиму і вони вийдуть з ладу. Аналогічне блокування у сучасних установках може реалізовуватися через реле потоку повітря. Автоматичне регулювання температури здійснюється двома терморегуляторами А1 і А2 з роздільними уставками (А1 на 2–3 °С вище за А2), які по черзі вмикають і вимикають першу і другу секцію, тоді як третя працює постійно. Захист від перегрівання ТЕНів при відмові вентилятора або датчика потоку забезпечує термомагнітне реле SK, яке при критичній температурі всередині корпусу калорифера знеструмлює всі три секції через пускач КМ4. Вологохімічностійке покриття агрегатів і сільськогосподарське виконання

електродвигунів дозволяють розміщувати ЕКУ безпосередньо в теплиці з хімічно агресивним середовищем (підвищена вологість, агресивні гази).

5. Розрахунок потужності обігрівальних установок парників і теплиць

Розрахункова потужність нагрівних елементів визначається з умови компенсації теплових втрат крізь покриття у найхолоднішу нічну годину розрахункового місяця. У спорудах захищеного ґрунту близько 85 % теплових втрат відбувається через плівкове або скляне покриття - тому в першому наближенні ними і обмежується. Формула для визначення потужності: $P = k \cdot F \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{зов}}) \cdot 10^{-3}$, кВт, де k - наведений коефіцієнт теплопередачі через скло або плівку, Вт/(м²·°C); F - площа покриття, м²; $T_{\text{вн}}$ і $T_{\text{зов}}$ - розрахункова температура повітря всередині та зовні, °C. Коефіцієнт k залежить від швидкості вітру: при швидкості від 0 до 10 м/с він змінюється від 4 до 12 Вт/(м²·°C). При розрахунку зазвичай приймають $k = 8-12$ Вт/(м²·°C) для відкритих ділянок або $k = 4-6$ Вт/(м²·°C) для захищених від вітру.

Площу заскленої поверхні парника визначають як $F = a \cdot b \cdot n \cdot \alpha$, де $a = 1,6$ м - довжина парникової рами, $b = 1,06$ м - ширина, n - кількість рам, $\alpha = 0,95$ - коефіцієнт, що враховує площу дерев'яних частин. Так, для 30-рамного парника: $F = 1,6 \cdot 1,06 \cdot 30 \cdot 0,95 \approx 48,3$ м². При розрахунковій температурі всередині +18 °C і зовні -5 °C потужність: $P = 11,6 \cdot 48,3 \cdot (18 - (-5)) \cdot 10^{-3} \approx 12,9$ кВт. При комбінованому обігріванні цю потужність ділять між ґрунтом та повітрям у співвідношенні 1:1 або 1:2.

Довжина нагрівального проводу для однієї фази визначається з потрібної потужності секції: $l = P_1 \cdot 10^3 / p_{\text{доп}}$, де $p_{\text{доп}}$ - допустима питома погонна потужність проводу (9-13 Вт/м залежно від марки). Крок укладання проводу $h = F / (3 \cdot l)$, де F - площа обігрівної поверхні. Для практичного прикладу: при $P_1 = 2,15$ кВт і $p_{\text{доп}} = 12$ Вт/м довжина проводу на фазу $l = 2150 / 12 \approx 179$ м, крок укладання $h = 48,3 / (3 \cdot 179) \approx 0,1$ м = 10 см.

При розрахунку систем повітряного обігріву теплиць спочатку визначають потрібну потужність ЕКУ з теплового балансу приміщення (рахуючи тепловтрати через покриття і нагрів вентиляційного повітря), після чого підбирають тип і кількість агрегатів СФОЦ або СФОО. Вибір вважають правильним, якщо дійсний тепловий потік через поверхню нагрівачів ЕКУ не менше ніж у 1,15–1,20 рази перевищує розрахунковий.

6. Автоматизація мікроклімату. Електробезпека в спорудах захищеного ґрунту

Для автоматичного підтримання температури ґрунту у плівкових теплицях застосовують пристрій КЕПТ-1УХЛЗ.1. Він реалізує двопозиційне тиристорне регулювання потужності: при розігріванні нагрівні елементи вмикаються на повну потужність P_n , а після виходу на режим - на знижені рівні (половинна потужність: включення і вимкнення по 20 хв; чвертна потужність). Програмне реле часу, що входить до складу КЕПТ-1, виконує дві функції: підтримує задану добову температурну програму та забороняє вмикати нагрів у години максимального навантаження енергосистеми (ранковий і вечірній пікові часи), що реалізує двосторонній вииграш - і точність підтримання температури, і зниження витрат за диференційованим тарифом. Захист від струмів витікання реалізований через реле струму з датчиком - трансформатором струму, яке при появі витікання вимикає автоматичний вимикач живлення. Вольтметр з перемикачем дозволяє перевіряти цілісність нагрівних проводів по фазах без відключення установки.

Питання електробезпеки в спорудах захищеного ґрунту є особливо важливими, оскільки постійна висока вологість ґрунту та повітря суттєво знижують перехідні опори і підвищують небезпеку ураження електричним струмом. За цими умовами всі споруди захищеного ґрунту з електрообігрівом поділяють на дві категорії. До категорії А відносяться споруди, де для живлення нагрівних елементів використовується напруга вище 65 В, а нагрів ґрунту або повітря здійснюється неізольованими нагрівальними пристроями (неізольований

дріт у піщовому шарі, проводи ПОСХВ/ПОСХП/ПОСХВТ без металевої екрануючої сітки, асфальтобетонний моноліт). У спорудах категорії А заборонено виконувати будь-які роботи при увімкненому електрообігріві - це найвища ступінь небезпеки. Такі споруди обносяться суцільною огорожею заввишки не менше 2 м і розміщуються на відстані не менше 1 м від найближчих будівель.

До категорії Б відносяться споруди, в яких використовують напругу нижче 65 В або напругу вище 65 В при застосуванні проводів ПОСХВ/ПОСХП/ПОСХВТ із заземленою металевою екрануючою сіткою поверх нагрівного шару, або пристрою захисного вимикання (ПЗВ), або прокладання нагрівальних елементів в азбестоцементних трубах. У спорудах категорії Б допускається виконувати роботи при увімкненому обігріві за умови використання інструменту з ізолюючими рукоятками і за умови, що інструмент не занурюють у ґрунт на глибину більше 25 см. В обох категоріях опір ізоляції нагрівних елементів відносно землі і між фазами повинен бути не менше 0,5 МОм і перевіряється перед кожним сезоном. У сучасних установках 2024–2026 рр. застосування ПЗВ з порогом спрацювання 30 мА стало стандартом навіть для систем категорії А з ізоляцією провідників, оскільки поступова деградація ізоляції ПОСХП у ґрунті відбувається непомітно, а ПЗВ забезпечує постійний захист незалежно від стану ізоляції.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть основні параметри мікроклімату в спорудах захищеного ґрунту. Який допустимий температурний перепад між ґрунтом і повітрям? Яке його правило для денного та нічного часу?

2. Порівняйте ґрунтовий і повітряний способи обігрівання за такими критеріями: питома потужність (Вт/м^2), теплоакумуючий ефект, капітальні витрати, рекомендовані строки введення в експлуатацію.

3. Чому при повітряному обігріванні витрата електроенергії приблизно на 50 % більша, ніж при ґрунтовому? Для яких строків введення теплиці в експлуатацію кожен із способів є оптимальним?

4. Опишіть конструкцію ґрунтового обігріву нагрівним проводом ПОСХВ у теплиці: глибина укладання, ширина смуги, захисна сітка, причина зменшення кроку укладання у крайніх смугах.

5. Що таке електрокалориферна установка серії СФОЦ? Розшифруйте маркування. Чому калорифер встановлюють з боку всмоктування вентилятора? Що відбудеться, якщо вентилятор зупиниться при увімкнених ТЕНах?

6. Опишіть принцип трисекційного регулювання потужності ЕКУ СФОЦ-25. Яким захисним блокуванням забезпечується запобігання перегріву ТЕНів при зупинці вентилятора?

7. Запишіть формулу для розрахунку потужності нагрівних елементів парника або теплиці. Від чого залежить коефіцієнт теплопередачі k ? Чому при розрахунку враховують переважно втрати через покриття, а не через ґрунт?

8. Розрахуйте площу заскленої поверхні 30-рамного парника, знаючи розміри рами (1,6×1,06 м) і коефіцієнт дерев'яних частин 0,95. Як визначити крок укладання нагрівального проводу?

9. Що таке пристрій КЕПТ-1УХЛЗ.1? Опишіть його роль у автоматизації мікроклімату теплиці. Яку функцію виконує реле часу, крім підтримання добової програми?

10. Охарактеризуйте категорії А і Б споруд захищеного ґрунту за умовами електробезпеки. Які роботи дозволено виконувати у теплиці категорії Б при увімкненому обігріві? Яка мінімально допустима величина опору ізоляції нагрівних елементів?

Лекція 1.7

Тема: «Електронагрівальні установки для теплової обробки і сушіння с.-г. продуктів і кормів»

ПЛАН

1. Вимоги до збереження зерна. Способи сушіння та їх порівняльна характеристика

2. Активне вентилявання зерна: установки ВПЕ-6А і бункери БВ. Розрахунок потужності
3. Сушіння сіна. Установки УДС-300 і НВЕ
4. Інфрачервоне сушіння і дезінсекція зерна
5. Електротеплова обробка кормів: запарювання картоплі, термохімічна обробка соломи
6. Пастеризація молока. Регулювання потужності електронагрівальних установок

1. Вимоги до збереження зерна. Способи сушіння та їх порівняльна характеристика

Зернові культури після збирання мають відносну вологість 20–22 %, тоді як для тривалого зберігання необхідно знизити її до 14–16 %. Надлишкова волога активізує дихання зерна, сприяє розвитку мікроорганізмів і шкідників, зрештою призводить до самонагрівання і псування. Забруднення зернової маси смітними домішками - бур'янами, частинами рослин, пилом - ще більше підвищує вологість і прискорює псування, тому попереднє очищення повинне проводитися одразу після збирання. Залежно від виду домішки вологість може сягати 45 %, що означає значний перерозподіл вологи між домішками і зерном протягом перших 24 годин зберігання. Своєчасне очищення - неодмінна умова якісного зберігання, причому воно одночасно покращує сипучість зернової маси і запобігає застряганню в шахтах сушарок.

Для сушіння зерна застосовують кілька способів. Вентилювання невідігрітим повітрям є найбільш щадним: зародок зерна не пошкоджується, що критично для насіннєвого матеріалу. Проте процес потребує від трьох діб до тижня і можливий лише при відносній вологості навколишнього повітря нижче 65 %. Сушіння відігрітим повітрям - основний промисловий метод. Воно значно продуктивніше, але потребує суворого дотримання температурного режиму: гранично допустима температура нагрівання зерна залежить від культури, призначення і початкової вологості. Для продовольчого зерна за один пропуск

через сушарку допустиме зниження вологості на 5–6 %, для насінневого - не більше 4–5 %, а температура зерна не повинна перевищувати 45 °С. Циркуляційне сушіння, при якому зерно багаторазово проходить через сушильну камеру, дозволяє застосовувати вищу температуру повітря без ризику пошкодження через короткочасність контакту та інтенсивніше перемішування. Для сушіння зерна також використовують шахтні, барабанні, камерні та рециркуляційні сушарки; модульні агрегати (наприклад, 1195 ВЕМ-NG) забезпечують автоматичне регулювання вологості вивантажуваного зерна.

2. Активне вентилявання зерна: установки ВПЕ-6А і бункери БВ.

Розрахунок потужності

Активне вентилявання є найпоширенішим, ефективним і економічним електричним способом сушіння зерна в умовах господарств. Суть методу - примусова продувка зернової маси повітряним потоком, що виносить надлишкову вологу. При цьому допускається нагрівання повітря не більше ніж на 5–6 °С відносно зовнішнього - тобто завжди використовується низькопотенційна теплота, а не інтенсивний нагрів.

Агрегат ВПЕ-6А з високонапірним вентилятором і ТЕНами встановлюють зовні зернового складу і послідовно підключають до повітророзподільних каналів різних засіків. Теплова продуктивність агрегату - 80 000 кДж/год, подача повітря - 13 000 м³/год, встановлена потужність - 32 кВт, з яких 22 кВт припадає на нагрівники. Кількість ввімкнених груп ТЕНів регулює теплову потужність, а жалюзі на вхідному патрубку - подачу повітря. Сушіння вважають завершеним, якщо відносна вологість верхнього шару зерна знизилася до 15–16 %.

Бункер активного вентилявання (серія БВ-6, БВ-12,5, БВ-25, БВ-50) складається з двох концентричних перфорованих циліндрів, між якими засипається зерно. Відцентровий вентилятор нагнітає повітря у внутрішній циліндр; воно пронизує шар зерна від центру до зовнішньої стінки і виводиться назовні, забираючи вологу. Пересувний поршень-заглушка встановлюють трохи нижче верхнього рівня зерна - це запобігає виходу підігрітого повітря у

незаповнену верхню зону бункера і забезпечує ефективне просушування всього шару. При відносній вологості зовнішнього повітря понад 65 % автоматично вмикається електрокалорифер для попереднього підігрівання повітря. Автоматика бункера БВ-25 реалізована на трьох датчиках вологості: S1 і S2 (уставки 70 і 80 %) керують першою і другою секціями ТЕНів, S3 (уставка 65 % на виході) - вимикає вентилятор і нагрівники після досягнення заданої кінцевої вологості. Реле часу КТ (витримка 9–10 хв) запобігає хибному спрацюванню S3, поки тепле повітря не пройшло через весь шар зерна.

Розрахункову потужність електропідігрівача повітря визначають за тепловим балансом: $P = Vt \cdot \rho \cdot (h_1 - h_0) / (\eta_e)$, де Vt - подача вентилятора, м³/с; ρ - щільність повітря, кг/м³; h_1 і h_0 - ентальпія підігрітого і зовнішнього повітря, кДж/кг; $\eta_e = 0,90-0,95$ - ККД нагрівника. У спрощеному варіанті: $\Phi_p = 0,278 \cdot Vt \cdot \rho \cdot c \cdot V \cdot (T_k - T_n)$, де T_k і T_n - температури повітря на виході й вході калорифера. Потужність установки $P = K_z \cdot \Phi_p / (\eta \cdot \eta_k)$, де $K_z = 1,05-1,1$ - коефіцієнт запасу, $\eta_k = 0,90-0,95$ - ККД калорифера.

3. Сушіння сіна. Установки УДС-300 і НВЕ

Сіно після скошування провялюють у полі до вологості 40–45 %, після чого формують скирту на підстібному несучому каналі і досушують примусовим вентиляванням. Повітря, що подається вентилятором через несучу ферму, проходить крізь весь стіг назовні, знижуючи вологість до кінцевих 12–17 %. Тривалість сушіння у скирті - 45–80 год, питома витрата електроенергії - 30–45 кВт·год/т. Одна людина обслуговує 4–5 підстібних каналів. Порівняно з природним сушінням ця технологія збільшує вихід сіна з 1 га на 30–55 %, у 3–4 рази підвищує вміст каротину і скорочує час сушіння на 30–32 %.

Установка УДС-300 для досушування розсипного або пресованого сіна складається з осьового вентилятора, електрокалорифера і системи розподільних повітроводів. Встановлена потужність - 19,5 кВт, у тому числі 15 кВт - калорифер. Подача повітря - 20 000 м³/год. Система займає площу 50 м², дозволяє накладати сіно шарами висотою до 6 м і за сезон досушує 50–60 т. Для установок

вентилювання сіна УВС-10 і ОВС-16 призначені спеціалізовані електрокалорифери НВЕ-63 і НВЕ-100 (потужністю 63 і 100 кВт відповідно) з латунними трубками ТЕНів і оребренням. Калорифери встановлюють між вентиляторами і підстібними каналами і мають дві секції, що дозволяє ступінчасто регулювати теплову потужність.

4. Інфрачервоне сушіння і дезінсекція зерна

Інфрачервоні промені проникають у зерно на глибину 1,2–2 мм і швидко нагрівають його поверхневий шар. Висока інтенсивність підведення теплоти є перевагою і одночасно обмеженням методу: при безперервному опроміненні зерно перегрівається, що знижує схожість і хлібопекарські властивості. Тому в промислових установках для сушіння зерна ІЧ-променями застосовують переривчасте опромінення з одночасним обдуванням холодним повітрям - зерно нагрівається до +50 °С, але не перевищує цього порогу. Зерно тонким шаром повільно пересипається по нахиленому ряду обертових барабанів (або по решітці) і опромінюється ІЧ-лампами або ТЕНами. Шкідники зерна нагріваються до вищої температури, ніж зерно, завдяки кращому поглинанню ІЧ-випромінювання, і гинуть - тому метод забезпечує одночасне сушіння і дезінсекцію. Дозована дія ІЧ-випромінювання позитивно впливає на посівні якості насіння, тому розроблено ряд установок для передпосівного опромінення.

У 2024–2026 рр. у зв'язку з нестабільним газопостачанням в Україні спостерігається зростання інтересу до електричних сушарок різних типів. Особливо актуальними стали малогабаритні ІЧ-сушарки вітчизняного виробництва для господарств малої і середньої потужності - вони не залежать від газових мереж, легко автоматизуються і не вимагають дорогої опалювальної інфраструктури.

5. Електротеплова обробка кормів: запарювання картоплі, термохімічна обробка соломи

Підготовка кормів до згодовування є важливою складовою зоотехнічної практики. Теплова обробка руйнує патогенну мікрофлору, покращує перетравність і поживну цінність. Питома витрата електроенергії для основних процесів: електропастеризація молока - 83,5 кВт·год/т; електрозапарювання картоплі - 70 кВт·год/т; електротермохімічна обробка зерна і соломи - 180 кВт·год/т.

Електрозапарювання картоплі в електродних запарниках здійснюється принципово інакше, ніж у традиційних парових котлах. Через подрібнену на частки розміром 1,5–3 мм картопляну масу, вміщену між пластинчастими електродами, пропускають електричний струм густиною 0,2–0,4 А/см². Струм проходить безпосередньо через картопляну масу і за законом Ленца–Джоуля швидко нагріває її до заданої температури. Час обробки суттєво скорочується порівняно з традиційним паровим способом (40–60 хв), при якому картопля довго витримується за підвищеної температури і кормова цінність знижується. Електродний спосіб дозволяє точніше контролювати температуру і час нагрівання, що покращує якість готового корму.

Термохімічна обробка соломи поєднує механічне подрібнення, зволоження, хімічну обробку (наприклад, їдким натром) і теплову обробку для руйнування лігноцелюлозного комплексу соломи та підвищення її перетравності. Електронагрів у таких установках забезпечує рівномірне та контрольоване підведення теплоти, що неможливо відтворити при паровому обігріві через складний хімічний склад середовища. Питома витрата електроенергії 180 кВт·год/т є вищою порівняно з іншими кормовими процесами, але обробка соломи перетворює практично незасвоювану рослинну масу на повноцінний корм, що в умовах нестачі якісних кормів є економічно виправданим.

6. Пастеризація молока. Регулювання потужності електронагрівальних установок

Пастеризація молока - це теплова обробка, що знищує патогенні мікроорганізми без суттєвої зміни смакових і поживних властивостей. Стандартний режим: тривала пастеризація - 63–65 °С протягом 30 хв; короткочасна - 72–76 °С протягом 15–20 с; моментальна (ульtrapастеризація) - 85–90 °С, витримка кілька секунд. Пастеризаційно-охолодна установка ОПФ-1-300 продуктивністю 1000 л/год заснована на пластинчастому теплообміннику з п'ятьма секціями: дві секції рекуперації (відбір теплоти гарячого молока для підігріву холодного - економія до 60–70 % теплоти), секція пастеризації (нагрів гарячою водою до 90 °С) і дві секції охолодження. Ключовим елементом автоматизації є електрогідравлічний перепускний клапан: поки молоко на виході з секції пастеризації не досягло заданої температури, клапан за командою терморегулятора А1 (типу МСР-1) повертає молоко на повторну пастеризацію у вирівнювальний бак. Це критично важливий захист: молоко з температурою нижче нормативної могло б потрапити у торгову мережу непастеризованим.

В електропастеризаторах тонкий шар молока нагрівається інфрачервоними променями, що добре поглинаються молочним жиром. Одночасне ультрафіолетове опромінення закріплює бактерицидний ефект і збагачує молоко вітамінами групи D. Такі установки мають компактні розміри і дозволяють реалізувати режим ульtrapастеризації за набагато коротший час порівняно з традиційним нагрівом.

Регулювання потужності електронагрівальних установок здійснюють кількома методами. Найпоширеніший - перемикання секцій нагрівальних елементів у різні схеми з'єднання: послідовна «зірка» дає найменшу потужність ($0,5 \cdot P_{ref}$), паралельний «трикутник» - найбільшу ($6 \cdot P_{ref}$); поєднання схем «зірка/трикутник» з розподілом кожної фази на дві секції дозволяє отримати сім ступенів потужності у відношенні 0,5 : 1 : 1,5 : 2 : 3 : 4 : 6. Такий діапазон регулювання достатній для більшості практичних задач. Для плавного регулювання застосовують автотрансформатори або тиристорні регулятори напруги: змінюючи кут відкриття тиристорів, безступінчасто регулюють діюче значення напруги на нагрівниках від нуля до номінального. Температуру повітря

в електрокалориферах регулюють також зміною продуктивності вентилятора. У брудерах та установках з ІЧ-опромінювачами - зміною висоти підвішування і увімкненням/вимкненням нагрівальних елементів.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. За яких умов можливе тривале зберігання зерна без сушіння? Чому попереднє очищення зерна необхідно проводити безпосередньо після збирання, а не через добу?

2. Порівняйте вентилявання непідігрітим і підігрітим повітрям за такими критеріями: допустима вологість повітря, тривалість процесу, гранична температура зерна, придатність для насіннєвого матеріалу.

3. Опишіть конструкцію та принцип роботи бункера активного вентилявання (серія БВ). Яку функцію виконує пересувний поршень-заглушка? Для чого потрібне реле часу КТ у схемі автоматики?

4. Запишіть формулу для розрахунку потужності електрокалорифера в сушильній установці. Що таке ентальпія повітря і чому для її визначення використовують h-d діаграму?

5. Опишіть технологічний процес сушіння сіна за методом досушування у скирті. Які переваги дає цей спосіб порівняно з природним сушінням у полі? Яка питома витрата електроенергії?

6. Чому в установках для сушіння зерна ІЧ-променями застосовують переривчасте опромінення з обдуванням холодним повітрям, а не безперервне? Яким чином забезпечується одночасна дезінсекція?

7. У чому принципова відмінність електродного запарника картоплі від традиційного парового? Поясніть, чому електродний спосіб краще зберігає кормову цінність картоплі.

8. Поясніть принцип рекуперації теплоти в установці ОПФ-1. Яку роль відіграє перепускний клапан у схемі автоматики пастеризатора? Що відбувається при зниженні температури молока нижче нормативної?

9. Опишіть сім ступенів потужності, що отримуються при перемиканні двох однакових секцій між схемами «зірка» і «трикутник». Яке відношення мінімальної потужності до максимальної при такому способі регулювання?

10. Порівняйте три методи регулювання потужності електронагрівальних установок - ступінчасте перемикання секцій, автотрансформаторне регулювання і тиристорне регулювання - за точністю, простотою схемної реалізації та можливістю автоматизації.

Лекція 1.8

Тема: «Електричні холодильні машини і теплові насоси (застосування в АПК)»

ПЛАН

1. Фізичні основи отримання штучного холоду. Способи охолодження
2. Компресійна холодильна машина: принцип дії, холодоагенти, основні параметри
3. Холодильне обладнання для охолодження молока. Резервуар МКА-2000Л-2А і танк ТОМ-2А
4. Термоелектричне охолодження. Ефект Пельтьє та його застосування в АПК
5. Тепловий насос: принцип дії, коефіцієнт перетворення, типи насосів
6. Застосування теплових насосів у тваринництві. Розрахунок холодильної установки

1. Фізичні основи отримання штучного холоду. Способи охолодження

Отримання штучного холоду - це процес відбирання теплоти від об'єкта і зниження його температури нижче за температуру навколишнього середовища. Природне охолодження дозволяє знизити температуру лише до рівня навколишнього середовища і залежить від кліматичних умов. Тому в АПК застосовують виключно штучне охолодження, що потребує витрат електричної або теплової енергії.

Безмашинні способи охолодження (лід, льодо-сольові суміші, сухий лід) не забезпечують стабільного підтримання заданої температури, потребують ручної праці та регулярного поповнення запасів. Найнижча досяжна температура при охолодженні звичайним льодом - лише $+4\dots+6$ °C. Сухий лід (твердий CO_2) дозволяє досягти нижчих температур і не зволожує продукти, але є дорогим і небезпечним у концентрованих приміщеннях (при концентрації CO_2 понад 3 % виникає ризик отруєння). Усі безмашинні способи практично витіснені машинними завдяки принципovým перевагам останніх: автоматичне підтримання постійної температури, висока санітарно-гігієнічна надійність, простота обслуговування, можливість охолодження до будь-якої заданої температури.

В основі машинного охолодження лежить процес кипіння спеціальних рідин - холодоагентів - при низьких температурах і тиску, трохи вищому за атмосферний. При кипінні рідина поглинає теплоту пароутворення з навколишнього середовища, охолоджуючи його. Пара, що утворилася, стискується компресором і конденсується, виділяючи теплоту в навколишнє середовище з вищою температурою. Таким чином, теплота «перекачується» з холодного середовища у тепле за рахунок зовнішньої роботи. Цей принцип є спільним і для холодильної машини, і для теплового насоса.

2. Компресійна холодильна машина: принцип дії, холодоагенти, основні параметри

Компресійна холодильна машина складається з чотирьох послідовно з'єднаних елементів, що утворюють герметично замкнений контур: компресор, конденсатор, терморегулюючий вентиль і випарник. Компресор відсмоктує пари холодоагенту з випарника при низькому тиску та температурі кипіння (P_0, t_0), стискує їх до тиску та температури конденсації (P_k, t_k) і нагнітає в конденсатор. Конденсатор є теплообмінним апаратом, де стиснуті пари охолоджуються водою або повітрям і переходять у рідкий стан, виділяючи теплоту. Рідкий холодоагент через терморегулюючий вентиль дроселюється - різко знижує тиск від P_k до P_0 -

і надходить у випарник. У випарнику при низькому тиску холодоагент закипає, відбираючи теплоту з охолоджуваного середовища і перетворюючись на пару. Далі цикл повторюється. Холодоагент при цьому не витрачається, а лише циклічно змінює агрегатний стан за схемою рідина→пар→рідина.

Холодоагенти - це хімічні речовини, що киплять при низьких температурах і є робочим тілом холодильної машини. Фреон-12 (CF_2Cl_2 , R-12) має температуру кипіння $-29,8$ °C при атмосферному тиску, не токсичний, безпечний для продуктів і добре розчиняється в компресорному маслі. Однак він руйнує озоновий шар і з 1995 року заборонений до виробництва в розвинутих країнах Монреальським протоколом. У нових установках R-12 замінений на HFC-134a (R-134a) та інші ознобезпечні аналоги. Фреон-22 (CHF_2Cl , R-22) має кращі холодильні характеристики, температуру кипіння -40 °C, але також є озоноруйнуючим і підлягає поступовій заміні на R-410A та R-407C. Аміак (NH_3 , R-717) відзначається високою об'ємною холодопродуктивністю (1312,7 кДж/кг проти 161,5 кДж/кг у фреону-12), але є токсичним - допустима концентрація у повітрі лише 0,02 мг/л, а при концентрації 0,5–1 % протягом 60 хвилин можливі смертельні наслідки. Аміак вибухонебезпечний при концентрації 16–25 % у повітрі. Незважаючи на недоліки, аміак є найбільш поширеним у промислових холодильних установках завдяки нульовому потенціалу руйнування озонового шару і низькій вартості.

Основним параметром, що характеризує холодильну машину, є холодопродуктивність - кількість теплоти, яку установка відбирає з охолоджуваного середовища за одиницю часу: $P = k \cdot m \cdot C \cdot (T_1 - T_2) / (3600 \cdot \tau)$, кВт, де $k = 1,2$ - коефіцієнт запасу; m - маса продукту, кг; C - питома теплоємність, кДж/(кг·°C); T_1 і T_2 - початкова і кінцева температури, °C; τ - час охолодження, год. Холодильний коефіцієнт $\varepsilon = Q_x / (W \cdot \eta_k \cdot \eta_d)$ є відношенням холодопродуктивності до потужності, споживаної компресором, і характеризує ефективність машини. Для промислових компресійних установок $\varepsilon = 2-5$, для побутових - 2–3.

3. Холодильне обладнання для охолодження молока. Резервуар МКА-2000Л-2А і танк ТОМ-2А

Свіжодоєне молоко має температуру $+35\dots+37$ °С. За санітарними нормами воно повинне бути охолоджене до $+4\dots+6$ °С протягом 2 годин. Мікробіологічна обсімененість молока при охолодженні до $+4$ °С знижується в 10–100 разів порівняно з температурою $+10$ °С, тому швидкість охолодження є визначальним чинником якості молока.

Резервуар-охолодник молока МКА-2000Л-2А (місткість 2000 л) є прикладом установки з прямим охолодженням - без проміжного холодоносія. Дно молочної ванни виконано у вигляді щільного випарника, що безпосередньо контактує з молоком. Холодоагент R-12 (у сучасних моделях - R-134a) циркулює в замкненому контурі компресорно-конденсаторного агрегату ДХ2-28-068/0. Молоко охолоджується в автоматичному режимі до заданої температури, підтримуваної мішалкою, що забезпечує рівномірний теплообмін. Принциповою особливістю конструкції є рекуператор: теплота конденсації стиснутих парів холодоагенту, яку зазвичай скидають у навколишнє середовище, тут використовується для нагріву води. При охолодженні 1 т молока отримують 0,7 т води температурою $50\text{--}60$ °С. Це дозволяє економити до 2,5 т умовного палива на рік у перерахунку на одну установку - суттєвий економічний ефект для молочної ферми.

Танк-охолоджувач молока ТОМ-2А місткістю 1800 л застосовує непряме охолодження через систему зрошування: зовнішня поверхня молочної ванни зрошується водою, яка охолоджується у кожухотрубному випарнику аміачної установки. Молоко охолоджується від $+36$ °С до $+6$ °С за 2,5 год. Реле тиску РД-1 здійснює захист від надмірно низького тиску у лінії всмоктування (захист від «мокрого» ходу компресора) і від підвищеного тиску у конденсаторі (захист від перегріву). Система автоматичного керування ТОМ-2А має чотири режими роботи: «Лід» (попереднє наморожування льоду на панелях випарника за 3,5 год до заливки молока), «Автоматика», «Ручне» і «Відключено». У режимі «Лід» термореле SK1 з уставкою -5 °С керує компресором і вентилятором

конденсатора. У режимі «Автоматика» температурний контактний термометр SK2 підтримує температуру молока в діапазоні $+6...+7$ °С, вмикаючи і вимикаючи насос зрошування і мішалку. Пропускна спроможність установки - 5400 кг молока на добу за три цикли охолодження. Холодопродуктивність компресорного агрегату - 12 кВт.

4. Термоелектричне охолодження. Ефект Пельтьє та його застосування в АПК

У 1834 році французький фізик Жан Пельтьє виявив, що при проходженні постійного струму через замкнений ланцюг з двох різнорідних провідників один спай нагрівається, а інший охолоджується. Напрямок теплообміну залежить від напрямку струму: при його зміні охолоджений спай стає нагрітим і навпаки. Фізична природа явища полягає в тому, що на р-п-переході, де напрям потоку електронів збігається з контактною різницею потенціалів, кінетична енергія носіїв зростає і спай нагрівається; на п-р-переході електрони долають енергетичний бар'єр, витрачаючи енергію, і спай охолоджується.

Теплота Пельтьє визначається за формулою $Q = \Pi \cdot I$, де Π - коефіцієнт Пельтьє (В), I - сила струму (А). Коефіцієнт Пельтьє: $\Pi = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T$, де α_1, α_2 - коефіцієнти термо-ЕРС гілок (В/К), T - абсолютна температура спаю (К). Тривалий час ефект не мав практичного застосування через відсутність ефективних матеріалів. Лише після розвитку напівпровідникової техніки з'явилися термоелементи на сплавах вісмуту, телуру, свинцю і сурми з задовільними характеристиками.

Термоелектричний модуль складається з n- і p-напівпровідників, електрично з'єднаних послідовно і теплово - паралельно між двома керамічними пластинами з високою теплопровідністю. Перепад температур між холодним і гарячим спаями - $60-70$ °С, при каскадному підключенні модулів - до 150 °С. Головні переваги: повна відсутність рухомих частин (безшумність і висока надійність), відсутність холодоагентів (екологічна чистота), можливість плавного регулювання потужності і реверсу режиму (охолодження/нагрів)

зміною напрямку струму, мініатюрність. Недолік - нижча енергетична ефективність порівняно з компресійними машинами, що обмежує використання малими потужностями. У АПК термоелектричні холодильники застосовують у ветеринарії і селекції для зберігання біологічних об'єктів (сперма, вакцини, мікробіологічні культури). Термоелектричні кондиціонери перспективні для створення мікроклімату в кабінах тракторів і сільськогосподарських машин.

5. Тепловий насос: принцип дії, коефіцієнт перетворення, типи насосів

Тепловий насос є термодинамічним двійником холодильної машини: обладнання абсолютно однакове, але мета і акценти протилежні. У холодильній машині конденсатор скидає теплоту в навколишнє середовище як відхід, а корисним ефектом є холод з випарника. У тепловому насосі корисним ефектом є саме теплота, що виділяється конденсатором і передається споживачеві (система опалення, гаряче водопостачання), тоді як випарник відбирає низькопотенційну теплоту з природного або штучного джерела.

Джерелами низькопотенційної теплоти для випарника теплового насоса можуть бути: ґрунт (температура на глибині 1,5–2 м стабільна протягом усього року і становить +8...+12 °С); підземні та ґрунтові води; зовнішнє повітря (навіть при –20 °С у ньому достатньо теплоти); вентиляційне повітря, що видаляється з приміщень (12–25 °С); каналізаційні стоки і промислові скиди. Тепловий насос типу «ґрунт–вода» має найвищий коефіцієнт перетворення завдяки стабільній температурі джерела протягом усього року.

Коефіцієнт перетворення енергії (КПЕ) є основним показником ефективності теплового насоса: $KPE = Q_T/W = K_x + 1$, де Q_T - теплопродуктивність установки (кДж/год); W - споживана потужність (кДж/год); K_x - холодильний коефіцієнт. Значення КПЕ знаходиться в межах 2,5–5,0 для стандартних умов і до 6 при утилізації теплоти підземних вод. Це означає, що на кожну одиницю спожитої електроенергії тепловий насос доставляє споживачеві 2,5–6 одиниць теплоти. Чим менша різниця температур між джерелом і

споживачем, тим вищий КПЕ. Саме тому теплові насоси особливо ефективні у поєднанні з низькотемпературними системами опалення (тепла підлога, нагрів до $+35\dots+45\text{ }^{\circ}\text{C}$), а не з традиційними радіаторами ($+70\dots+90\text{ }^{\circ}\text{C}$).

За виглядом теплоносія на вході та виході теплові насоси поділяють на шість типів: ґрунт–вода, вода–вода, повітря–вода, ґрунт–повітря, вода–повітря, повітря–повітря. Компресійні фреонові теплові насоси серії НТ (НТ-25, НТ-40, НТ-80) мають теплову потужність від 11,6 до 128 кВт і коефіцієнт перетворення 3,1–3,2. Термоелектричні теплові насоси серії ТН (ТН-1,5, ТН-3, ТН-5, ТН-7,5) мають теплову потужність 1750–8700 Вт і $\text{КПЕ} = 2\text{--}4$.

6. Застосування теплових насосів у тваринництві. Розрахунок холодильної установки

Тваринницька ферма є ідеальним об'єктом для застосування теплового насоса в комбінованому режимі - одночасного охолодження молока і нагріву води. Молоко, що надходить від доїння при $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$, має бути охолоджене до $+4\dots+6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплота, що при цьому відбирається (близько 120–130 МДж на добу для ферми 200 голів), може бути «перекачана» тепловим насосом на вищий температурний рівень і використана для нагріву води для технологічних потреб - миття обладнання, напування тварин, санітарної обробки. Розрахунки показують, що теплота охолоджуваного молока дозволяє знизити витрату електроенергії на фермі ВРХ на 200 голів у 2,5–3 рази порівняно з традиційною схемою, де охолодження і нагрів води є двома незалежними процесами.

У 2024–2026 рр. в Україні, в умовах дефіциту газу і нестабільності енергопостачання, теплові насоси набули особливої актуальності для АПК. Їхня перевага - незалежність від газових мереж і значно вища ефективність порівняно з прямим електричним нагрівом (при $\text{КПЕ} = 3$ витрата електроенергії у три рази менша). Геотермальні теплові насоси «ґрунт–вода» можуть забезпечити до 80 % теплових потреб тваринницьких приміщень навіть у найхолодніший зимовий місяць. Для теплиць і парників теплові насоси «повітря–повітря» або «ґрунт–

повітря» є перспективними для підтримання мікроклімату з КПЕ 3–4, що суттєво знижує витрати на електрообігрів порівняно з прямим нагрівом ТЕНами.

Розрахунок холодильної установки зводиться до визначення необхідної холодильної потужності та вибору серійного агрегату. Приклад: потрібно охолодити продукт масою $m = 3000$ кг від $\theta_1 = 32$ °С до $\theta_2 = 5$ °С за $\tau = 3,5$ год; питома теплоємність $C = 3,93$ кДж/(кг·°С). Холодильна потужність: $P = k \cdot m \cdot C \cdot (\theta_1 - \theta_2) / (3600 \cdot \tau) = 1,2 \cdot 3000 \cdot 3,93 \cdot (32 - 5) / (3600 \cdot 3,5) = 30,3$ кВт. За таблицею технічних характеристик вибирають установку АВ-30 з холодильною потужністю 35 кВт при споживаній потужності 18 кВт, що дає холодильний коефіцієнт $\varepsilon = 35/18 \approx 1,9$. Запас холодопродуктивності відносно розрахункового значення: $35/30,3 = 1,15$, що знаходиться в допустимих межах (1,1–1,2). Правило вибору: холодильна потужність агрегату не повинна бути менше розрахункової, але і надмірний запас (більше 1,3) небажаний, бо збільшує капітальні витрати і знижує економічність роботи установки.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть безмашинні способи штучного охолодження. Яка мінімально досяжна температура при охолодженні звичайним льодом і льодо-сольовою сумішшю? Чому безмашинні способи поступаються компресійним?

2. Опишіть замкнений цикл компресійної холодильної машини. Яку роль відіграє терморегулюючий вентиль? Чому холодоагент не витрачається в процесі роботи машини?

3. Порівняйте R-12 (фреон-12) і аміак як холодоагенти за такими критеріями: токсичність, вибухонебезпечність, холодопродуктивність, вплив на озоновий шар. Чому R-12 виведений з виробництва і чим його замінили?

4. Запишіть формулу для розрахунку холодильної потужності. Що таке холодильний коефіцієнт і від яких факторів він залежить? Яке типове значення для компресійних установок?

5. Опишіть принципову конструкцію резервуара-охолодника МКА-2000Л-2А. У чому перевага прямого охолодження порівняно з непрямым? Яким чином рекуператор дозволяє економити до 2,5 т умовного палива на рік?

6. Поясніть роботу системи автоматичного керування танка-охолоджувача ТОМ-2А у режимах «Лід» і «Автоматика». Яку функцію виконує реле тиску РД-1? Навіщо лід наморожують до заливки молока?

7. Поясніть фізичний зміст ефекту Пельтьє. Яким чином зміна напрямку струму дозволяє перейти від охолодження до нагрівання? Які матеріали використовують для термоелементів у сучасних модулях?

8. Чим тепловий насос відрізняється від холодильної машини за конструкцією і за принципом використання? Що є корисним ефектом у кожному випадку?

9. Що таке коефіцієнт перетворення енергії теплового насоса (КПЕ)? Чому $\text{КПЕ} = 3$ означає, що тепловий насос ефективніший за прямий електронагрів у 3 рази? При якій умові КПЕ є найвищим?

10. Обґрунтуйте доцільність застосування теплового насоса в комбінованому режимі на молочній фермі. Чому одночасне охолодження молока і нагрів технологічної води дає значно більший економічний ефект, ніж два незалежних процеси?

МОДУЛЬ 2. ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ

Лекція 2.1

Тема: «Електротермічне обладнання ремонтних підприємств»

ПЛАН

1. Термічна обробка деталей у ремонтному виробництві: загартування, відпуск, нормалізація, відпал
2. Електричні печі опору: класифікація, типи, конструктивні особливості
3. Матеріали для футерівки і нагрівальних елементів електропечей
4. Індукційне нагрівання: принцип дії, глибина проникнення струму, типи установок
5. Індукційні тигельні та каналні печі. Розрахунок індукторів
6. Непряме індукційне нагрівання. Установки для ремонтних майстерень АПК

1. Термічна обробка деталей у ремонтному виробництві: загартування, відпуск, нормалізація, відпал

Ремонтні підприємства АПК - майстерні механізованих загонів, міжгосподарські майстерні та районні технічні центри - виконують відновлення деталей сільськогосподарської техніки. Значна частина технологічних операцій відновлення деталей пов'язана з термічною обробкою: зміною механічних властивостей сталі та чавуну шляхом контрольованого нагрівання і охолодження. Електричний нагрів є тут найбільш переважним: він дозволяє точно дозувати підведену теплоту, автоматизувати температурні режими і є набагато безпечнішим порівняно з полум'ям.

Загартування - це нагрівання сталюї деталі до температур вище критичних і наступне різке охолодження з метою підвищення твердості і міцності. Зміцненню при загартуванні піддаються сталі з вмістом вуглецю 0,3 % і вище. Розрізняють загартування об'ємне і поверхневе. При об'ємному загартуванні нагрівають і охолоджують весь об'єм деталі - такий метод застосовують для інструменту, пружин, шестерень. Для поверхневого

загартування (зубів шестерень, шийок валів, напрямних) найефективнішим є індукційний нагрів, що забезпечує прогрівання лише тонкого поверхневого шару заданої товщини при холодній серцевині.

Відпуск виконується після загартування для зниження крихкості і зменшення внутрішніх напружень. Деталь нагрівають до температури нижче критичної (150–650 °С, залежно від необхідного поєднання твердості і в'язкості) і повільно охолоджують. Нормалізація - нагрівання до температур вище критичних і охолодження на спокійному повітрі - застосовується для відновлення рівномірної дрібнозернистої структури після зварювання, кування або лиття. Відпал (нагрівання і дуже повільне охолодження разом з піччю) призначений для зниження твердості заготовок перед механічною обробкою або для зняття залишкових напружень після зварювання. Питомі витрати електроенергії на термічну обробку в печах опору - 300–400 кВт·год/т, а на індукційний нагрів - значно менше завдяки концентрованому підведенню потужності.

2. Електричні печі опору: класифікація, типи, конструктивні особливості

Електричні печі опору є найбільш поширеним обладнанням для термічної обробки деталей у ремонтних майстернях. У них теплота виділяється в нагрівальних елементах і передається деталі випромінюванням і конвекцією. За конструкцією розрізняють кілька основних типів.

Камерні електропечі опору серії СНОЛ призначені для будь-яких видів термічної обробки в повітряному середовищі до температури 1250 °С. Об'єм робочої камери - від 15 до 1000 л, потужність - від 5 до 63 кВт. Металевий кожух має дво- або тришарову футерівку з легковагових вогнетривких матеріалів, що забезпечує малі теплові втрати і знижену температуру зовнішньої поверхні. Нагрівальні елементи з ніхромового або фехралевого дроту розміщені на стінках і склепінні. У сучасних зразках регулювання температури виконується

цифровими мікропроцесорними регуляторами з пропорційно-інтегрально-диференційним (ПІД) законом, що забезпечує точність $\pm 1-2$ °С.

Камерні печі з висувним (викоченим) подом СНОЛ-ВП мають принципову конструктивну перевагу: завантаження і розвантаження відбуваються зовні печі, що дозволяє використовувати підйимально-транспортні засоби для важких деталей і практично усуває простій при роботі з двома подами. Продуктивність таких печей у 1,5–2,5 разу вища, а споживання електроенергії на 10–20 % менше порівняно з аналогічними камерними печами. Шахтні електропечі модульної конструкції СШО призначені для нагрівання довгомірних виробів (вали, осі, шнеки, штанги) у вертикальному положенні до температури 1000 °С. Модульна конструкція забезпечує до 80 % скорочення часу монтажу і полегшує заміну несправних нагрівальних елементів безпосередньо в умовах підприємства. Кожна теплова зона має автономний терморегулятор і прилад реєстрації температури. Рольгангові прохідні електропечі СРО у вигляді тунелю з декількох модулів призначені для низькотемпературної термообробки (середній і низький відпал, полімеризація) деталей, що пересуваються по рольгангу з автоматично регульованою швидкістю.

3. Матеріали для футерівки і нагрівальних елементів електропечей

Надійна і довготривала робота електропечі визначається правильним підбором матеріалів для всіх конструктивних елементів. Вогнетривкі матеріали утворюють внутрішній шар футерівки, що безпосередньо контактує з нагрітим простором. Ключові вимоги до них: вогнетривкість (для більшості матеріалів 1580–1770 °С, для високовогнетривких - понад 1770 °С), термостійкість до різких перепадів температур, механічна міцність при нагрітому стані і хімічна нейтральність до матеріалу деталей. Основні вогнетривкі матеріали отримують на основі кремнезему SiO_2 (вогнетривкість 1715 °С), глинозему Al_2O_3 (2070 °С) і оксиду магнію MgO (2800 °С): шамот, дінакс, магнезит, корунд, карборунд. Теплоізоляційний шар (зовнішній) із діатоміту, перліту, мінеральної вати або волокнистих керамічних матеріалів знижує загальні теплові втрати. Жаротривкі

матеріали (хромонікелеві сталі) використовують для несучих конструктивних елементів, рольгангів, кошиків-садок.

Матеріали нагрівальних елементів визначають максимальну температуру і надійність печі. Ніхром Х20Н80 (80 % Ni, 20 % Cr) - найбільш якісний матеріал з максимальною робочою температурою 1050–1100 °С; забезпечує стабільний опір протягом усього терміну служби. Фехраль Х13Ю4 і сплави ОХ23Ю5А, ОХ27Ю5А є залізохроміоалюмінієвими і значно дешевшими за ніхром; ОХ27Ю5А допускає температуру до 1300 °С для печей без постійного навантаження. Неметалеві нагрівальні елементи з карборунду (SiC) застосовують при температурах до 1550 °С; їх особливістю є «старіння» - поступове зростання опору в процесі експлуатації, що потребує регулятора вторинної напруги. Графітові нагрівники працюють до 2800 °С, але лише у вакуумі або нейтральній атмосфері.

4. Індукційне нагрівання: принцип дії, глибина проникнення струму, типи установок

Індукційне нагрівання засновано на перетворенні електромагнітної енергії безпосередньо в теплоту всередині металевого виробу. Індуктор - багатовиткова котушка (соленоїд) - створює змінне магнітне поле, яке наводить у виробі ЕРС. Під дією цієї ЕРС виникають вихрові струми (струми Фуко), що нагрівають метал за законом Ленца–Джоуля. Принципова відмінність від нагріву в печі опору - теплота виділяється безпосередньо в об'єкті, а не передається від зовнішнього нагрівника, тому питома потужність нагріву значно вища, а час нагріву - в десятки разів менший.

Глибина проникнення вихрових струмів у метал (глибина нагрітого шару) визначається за формулою Штейнметца: $h = 503 \cdot \sqrt{(\rho T / (\mu \cdot f))}$, де ρT - питомий опір матеріалу (Ом·м); μ - відносна магнітна проникність; f - частота струму (Гц). Зі збільшенням частоти глибина проникнення зменшується: при частоті 50 Гц у сталі $h \approx 10\text{--}15$ мм (наскрізний нагрів для заготовок до 250 мм і більше), при 8000 Гц - $h \approx 1\text{--}2$ мм (поверхнєве загартування шийок і зубів). При частоті понад 60

кГц нагрівається шар менше 0,5 мм - ультраповерхнєве загартування. Таким чином, вибором частоти струму точно задають глибину загартованого шару.

За частотою струму розрізняють три групи установок. Перша - промислової частоти (50 Гц), що живляться безпосередньо від мережі або через знижувальні трансформатори; застосовуються для наскрізного нагрівання великих заготовок і каналних плавильних печей. Друга - підвищеної частоти (500–10 000 Гц) від електромашинних або тиристорних напівпровідникових перетворювачів; використовуються для поверхневого загартування, пайки, нагрівання під кування. Третя - високочастотні установки (66 000–440 000 Гц і вище) від лампових генераторів; призначені для ультраповерхневого загартування і нагрівання дрібних деталей. Одинична потужність типових установок для АПК - 40–250 кВт при частоті від 0,5 до 8 кГц з тиристорними перетворювачами. Приклад маркування: ВЧІ-40/0,44-ЗП - високочастотна індукційна установка потужністю 40 кВт, частота 440 кГц, для поверхневого загартування.

5. Індукційні тигельні та каналні печі. Розрахунок індукторів

Індукційна канална піч (з осердям) працює на промисловій частоті 50 Гц. Циліндричний індуктор насаджений на замкнутий сталевий магнітопровід, набраний з листів електротехнічної сталі. Навколо індуктора виконана керамічна футерівка з вузьким кільцевим каналом (горизонтальним або вертикальним), де знаходиться рідкий метал. Замкнутий кільцевий контур рідкого металу є вторинною «обмоткою» трансформатора і нагрівається струмами, що в ньому індукуються. Необхідна умова роботи: в каналі завжди повинен бути рідкий метал - запустити з твердої шихти неможливо, тому або заливають порцію рідкого металу з іншої печі, або залишають залишкову ємність. Канальні печі ефективні для безперервного плавлення і витримки металу при точно заданій температурі.

Індукційна тигельна піч (без осердя) живиться струмами підвищеної або середньої частоти. Метал розплавляється в керамічному тиглі, що розташований

усередині циліндричного індуктора з мідних трубок з водяним охолодженням. Відсутність магнітопроводу знижує ефективність передачі енергії, тому потрібна підвищена частота. Природний $\cos\varphi$ таких печей надзвичайно малий (0,03–0,10), що вимагає обов'язкової компенсуючої батареї конденсаторів. Переваги тигельних печей перед каналними: можливість плавлення будь-якої твердої шихти без залишкового металу, висока рівномірність хімічного складу завдяки електродинамічному перемішуванню розплаву, можливість роботи у вакуумі або захисній атмосфері, висока продуктивність і зручність для фасонного лиття.

Електричний ККД установки індукційного нагрівання: $\eta_E = R'_{21}/(R_1 + R'_{21})$, де R'_{21} - активний опір тіла нагрівання, наведений до параметрів обмотки індуктора; R_1 - активний опір індуктора. Для забезпечення високого η_E необхідне мінімальне співвідношення зазору між індуктором і заготовкою та діаметром заготовки: чим менший відносний зазор, тим вищий η_E . Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$: оскільки індуктор є суто індуктивним навантаженням, $\cos\varphi$ без компенсації становить 0,03–0,15, тому паралельно до первинної обмотки трансформатора підключають компенсуючі конденсатори. Для наскрізного нагрівання круглих сталених виробів оптимальна частота (кГц): $30/d^2 < f < 60/d^2$, де d - діаметр у сантиметрах.

6. Непряме індукційне нагрівання. Установки для ремонтних майстерень АПК

Непряме індукційне нагрівання на промисловій частоті 50 Гц є економічно привабливим для ремонтних майстерень завдяки відмові від дорогих перетворювачів частоти. Конструкція такого нагрівача: всередині феромагнітних сталевих труб розміщений кабель або дріт-індуктор, намотаний так, щоб напрям струму у всіх провідниках труби був однаковим. Схема еквівалентна трансформатору, де індуктор - первинна обмотка, а труба - магнітопровід, вторинна обмотка і навантаження одночасно. У трубі виділяється 80–85 % теплової потужності, в обмотці-індукторі - лише 15–20 %, а $\cos\varphi$ становить 0,85–0,93, що значно краще за установки без сердечника.

Такі нагрівачі застосовують у ремонтних майстернях і агрообслуговуючих підприємствах АПК для: нагрівання технологічних трубопроводів і ємностей з в'язкими рідинами (трансмісійні оливи, дизельне паливо при низьких температурах); обігрівання підлоги і стін у боксах і приміщеннях для техогляду; нагрівання деталей у збірно-розбірних роботах - насадка підшипників, зубчастих коліс, муфт на вали (нагрівання до $+80\dots+120$ °С без відкритого полум'я). В умовах 2024–2026 рр. ця технологія є особливо актуальною, оскільки не потребує спеціального газового обладнання, а промислові насосні станції і підіймачі можна оснастити електроіндукційним підігрівом трубопроводів без суттєвих капітальних витрат.

Розрахунок непрямого індукційного нагрівача виконують за номограмою або аналітично. Приклад для нагрівача з кабелем у сталевій трубі при напрузі 380 В і температурі приміщення $+10$ °С: різниця температур між кабельною жилою і середовищем $\Delta T = 65 - 10 = 55$ °С; за номограмою допустима напруга на 1 м нагрівача $U' = 4,8$ В/м; довжина нагрівача на фазу $L_{\phi} = U_c/U' = 380/4,8 = 79,2$ м (схема з'єднання - «трикутник»); питома потужність $P' = 52$ Вт/м; потужність фази $P_{\phi} = P' \cdot L_{\phi} = 52 \cdot 79,2 = 4116$ Вт; сумарна потужність трифазної системи $P = 3 \cdot P_{\phi} = 12,35$ кВт. Цей розрахунок дозволяє спроектувати нагрівач безпосередньо в майстерні без спеціального обладнання, використовуючи стандартний кабель КВРГ і сталеві водопровідні труби.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть основні операції термічної обробки деталей у ремонтних майстернях АПК. У чому полягає різниця між загартуванням і відпуском? Чому загартуванню піддають лише сталь з вмістом вуглецю 0,3 % і вище?

2. Яка перевага поверхневого індукційного загартування перед об'ємним для деталей типу вали, шестерні? Чому при поверхневому загартуванні серцевина деталі залишається пластичною?

3. Опишіть конструкцію камерної електропечі серії СНОЛ. Яку роль відіграє дво- або тришарова футерівка? Які типи нагрівальних елементів у ній застосовуються?

4. У чому перевага камерної печі з висувним подом (СНОЛ-ВП) перед звичайною камерною піччю? Чому продуктивність таких печей вища в 1,5–2,5 рази?

5. Назвіть основні вимоги до вогнетривких матеріалів. На основі яких оксидів вони виготовляються? Чому до теплоізоляційних матеріалів вимоги менш жорсткі?

6. Порівняйте ніхром Х20Н80 і фехраль ОХ27Ю5А як матеріали нагрівальних елементів. Чому карборундові нагрівники потребують регулятора вторинної напруги?

7. Поясніть фізичний механізм індукційного нагрівання. Чому теплота виділяється безпосередньо в об'єкті, а не передається від зовнішнього нагрівника? Яке це дає практичне значення для ремонтного виробництва?

8. Запишіть формулу Штейнметца для глибини проникнення вихрових струмів. Поясніть, чому при частоті 50 Гц можна нагрівати заготовку наскрізь, а при 66 кГц - лише тонкий поверхневий шар.

9. Порівняйте індукційну каналну і тигельну плавильні печі. Чому каналну піч не можна запустити з твердої шихти? Чому тигельна піч потребує компенсуючих конденсаторів?

10. Поясніть принцип непрямого індукційного нагрівача на промисловій частоті. Чому такі нагрівачі є привабливими для ремонтних майстерень АПК? Як виконати розрахунок нагрівача з кабелем у сталевій трубі?

Лекція 2.2

Тема: «Побутові електронагрівальні прилади (принципи, нагрівальні елементи, режими та безпека застосування в АПК)»

ПЛАН

1. Класифікація побутових електронагрівальних приладів. Нагрівальні елементи і матеріали
2. Прилади для приготування їжі: електроплити, електрочайники, кип'ятильники, водонагрівники

3. Мікрохвильова і індукційна плити: принцип дії, переваги, особливості
4. Прилади для обігрівання приміщень: каміни, конвектори, масляні радіатори
5. Нагрівальний електроінструмент: паяльники, прибори для зварювання плівки
6. Правила безпечного застосування побутових електронагрівальних приладів в АПК

1. Класифікація побутових електронагрівальних приладів. Нагрівальні елементи і матеріали

Побутові електронагрівальні прилади є невіддільною частиною як сільського побуту, так і виробничої інфраструктури АПК - від обладнання кімнат відпочинку і їдалень до приміщень для персоналу тваринницьких ферм, зернових комплексів і агротехсервісних підприємств. Їх правильний вибір, монтаж і безпечна експлуатація безпосередньо впливають на умови праці і протипожежну безпеку об'єктів АПК.

За призначенням побутові електронагрівальні прилади поділяють на: прилади для приготування і підігріву їжі та води (електроплити, чайники, кип'ятильники, водонагрівники); прилади для обігрівання приміщень (каміни, конвектори, масляні електрорадіатори, теплові вентилятори); прилади для санітарно-побутових потреб (праски); нагрівальний електроінструмент (паяльники, прибори для зварювання плівки). Сучасна тенденція 2024–2026 рр. - зростання частки інверторних і теплонасосних технологій у побутовому обігріванні та відповідне витіснення малоефективних резистивних нагрівників - стосується і аграрного сектору.

Нагрівальні елементи більшості побутових приладів виготовляють з високоомних сплавів - ніхрому (Х20Н80, питомий опір 1,1 мкОм·м, робоча температура до 1000 °С) або фехралю (Х13Ю4, питомий опір 1,2–1,3 мкОм·м, до 800 °С). Фехраль дешевший, але більш крихкий; ніхром механічно міцніший і стійкіший до корозії. Нагрівальні елементи бувають відкритого типу (дріт або стрічка на керамічних ізоляторах), закритого типу (спіраль у трубках з

периклазовим наповнювачем - ТЕНи) і плоского типу (дріт на міканітовій основі, ізольованій слюдою). Електрична ізоляція виконується з периклазу, стеатиту, слюди або фарфору, теплоізоляція - з азбесту, шлакової вати або сучасних мінеральних матеріалів. Провідні виробники переходять від азбесту до безпечніших ізоляторів (мінеральне волокно, базальт).

2. Прилади для приготування їжі: електроплити, чайники, кип'ятильники, водонагрівники

Електричні праски - найбільш масовий побутовий електронагрівальний прилад. Вони поділяються на звичайні (до 3 кг) і малогабаритні (до 0,8 кг), а за конструкцією - на праски без терморегулятора, з терморегулятором і з терморегулятором та зволожувачем. Підосви виготовляють з чавуну, сталі або алюмінію; у сучасних моделях застосовують покриття з нержавіючої сталі або кераміки. Нагрівач - ТЕН або плоский елемент на міканітовій основі - розміщений безпосередньо в підосві. Терморегулятор - біметалічний, виконаний у вигляді лімба - забезпечує температуру підосви в діапазоні 60–90, 100–120 або 160–200 °С залежно від виду тканини. Сигнальна лампа, підключена паралельно через баластний опір, гасне, коли температура досягне заданого значення і терморегулятор відключить нагрівач.

Електричні плити бувають стаціонарними і переносними потужністю 3,2–8 кВт з 2–4 конфорками і жарочною шафою. Конфорки - круглі закриті пресовані або литі нагрівальні елементи діаметром 145–180 мм зі спіралями або ТЕНами - мають 5–7 ступенів регулювання потужності перемикачами. Жарочні шафи (духовки) оснащені ТЕНами і біметалічними терморегуляторами, що автоматично підтримують температуру в діапазоні 50–300 °С. Позначення моделі: перша буква вказує конструкцію, цифра після букв - кількість конфорок, наступна - номінальну потужність, кВт.

Для нагрівання і кип'ятіння води застосовують кип'ятильники з нагрівальними елементами типу ТТН і побутові водонагрівники (бойлери). Принциповою вимогою є обов'язкове занурення нагрівального елемента у воду

перед вмиканням - при «сухому ході» ТЕН перегрівається і виходить з ладу вже за кілька хвилин. Побутовий водонагрівник об'ємом 40–80 л має бак з нержавіючої сталі з теплоізоляцією, ТЕН потужністю 1,25–2,5 кВт і автоматику підтримання температури $+85 \pm 5$ °С. Магнієвий анод всередині бака захищає метал від електрохімічної корозії - це вузол, що потребує планової заміни кожні 2–3 роки. Схема автоматики: реле К керується термодатчиком SK - коли вода холодна, контакт розімкнений, реле спрацьовує і вмикає ТЕН; при нагріві до $+85$ °С контакт замикається, котушка реле закорочується і нагрівач відключається.

3. Мікрохвильова і індукційна плити: принцип дії, переваги, особливості

Мікрохвильова піч (МХП, НВЧ-піч) є принципово іншим способом нагрівання їжі порівняно з традиційним конвективним або резистивним. Магнетрон - вакуумний генератор - перетворює електричну енергію в мікрохвильове випромінювання частотою 2450 МГц (довжина хвилі 12,2 см), яке рівномірно проникає в харчовий продукт на глибину 3–5 см. Молекули води є електричними диполями: в змінному електромагнітному полі вони намагаються слідувати за зміною напрямку поля і здійснюють мільярди обертів за секунду. Молекулярне тертя нагріває продукт одночасно по всьому об'єму, а не з поверхні - це принципова відмінність від традиційної духовки, де тепло передається від поверхні всередину конвекцією і теплопровідністю.

Переваги мікрохвильової печі: час приготування скорочується в 5–10 разів; зберігається більша кількість вітамінів і мінеральних речовин завдяки короткому часу обробки; посуд від НВЧ-хвиль безпосередньо не нагрівається - лише від гарячої їжі. Обов'язкове обмеження: тільки неметалічний і неметалізований посуд - металеві деталі і металевий малюнок на посуді діють як вторинний випромінювач і можуть спричинити іскріння і пошкодження камери. Корпус МХП - це металевий екран, що запобігає виходу мікрохвиль назовні; ущільнення дверцят і блокування при відкритих дверцятах є критичними елементами безпеки.

Індукційна плита нагріває не саму варильну поверхню, а безпосередньо дно посуду вихровими струмами. Під склокерамічною поверхнею розміщена плоска індукційна котушка, якою протікає струм частотою 20–60 кГц. Посуд слугує вторинною обмоткою трансформатора: у феромагнітному дніщі наводяться вихрові струми, що нагрівають метал. Склокерамічне покриття практично не нагрівається - лише від гарячого посуду. Сучасна індукційна плита автоматично визначає наявність і розмір посуду і вмикає поле лише після його встановлення. ККД індукційної плити 85–90 % проти 60–70 % у традиційної електрики і 40–50 % у газової плити, що у 2024–2026 рр. є вагомим аргументом при зростаючих тарифах. Вимога до посуду: для частот 20–60 кГц ефективно нагрівається звичайна феромагнітна сталь і чавун; перевірити придатність посуду легко магнітом. Алюміній, мідь, скло і кераміка не нагріваються.

4. Прилади для обігрівання приміщень: каміни, конвектори, масляні радіатори

Електричні каміни є найпростішими опалювальними приладами з передачею теплоти переважно інфрачервоним випромінюванням. Конструкція: металевий корпус з відкритими або закритими (у кварцевих трубках) спіралями з ніхрому або фехралю на керамічних стрижнях і параболічним або плоским відбивачем з алюмінію або нержавіючої сталі. Потужність - 800–1250 Вт. Каміни нагрівають лише той простір і ті предмети, що знаходяться в зоні прямого «бачення» відбивача - теплова ефективність у великих приміщеннях невисока. Для службових кімнат і кімнат відпочинку персоналу ферм каміни є практичним рішенням для локального обігрівання робочих місць.

Конвектори передають теплоту переважно конвекцією: нагріте повітря піднімається від нагрівача вгору, холодне надходить знизу. Нагрівальні елементи - відкриті спіралі або ТЕНи з алюмінієвим оребренням - розміщені у вертикальному каналі корпусу. Потужність - 800–2500 Вт. На відміну від каміна, конвектор рівномірно прогріває весь об'єм приміщення і безпечніший у пожежному відношенні (нагрівний елемент не є відкритим випромінювачем).

Сучасні конвектори оснащені електронними терморегуляторами з точністю $\pm 0,5-1$ °C і таймерами, що дозволяє суттєво скоротити витрату електроенергії.

Масляні електрорадіатори передають теплоту конвекцією і випромінюванням від поверхні металевого корпусу, заповненого трансформаторним або спеціальним нагрівальним маслом. ТЕН потужністю 500–1500 Вт нагріває масло, яке циркулює в секціях корпусу природною конвекцією. Масло є акумулятором тепла: навіть після відключення прилад продовжує віддавати тепло протягом 15–30 хв, що зменшує кількість циклів вмикання/вимикання і знижує споживання. Температура зовнішньої поверхні корпусу - не більше 80–90 °C - є безпечною для персоналу і не загрожує пожежею при контакті з одягом. Це робить масляні радіатори найбільш безпечним типом стаціонарних обігрівачів для приміщень АПК з горючими матеріалами.

5. Нагрівальний електроінструмент: паяльники, прибори для зварювання плівки

Електропаяльники застосовуються на ремонтних ділянках сільськогосподарських підприємств, в майстернях КВП і автоматики, при виготовленні і ремонті електроустаткування. Паяльники безперервного нагрівання мають масивний мідний жало-стрижень, що акумулює теплоту і рівномірно її віддає. Стрижень нагрівається ніхромовою спіраллю на шарі слюдопласту; весь вузол закритий сталеву оболонкою. Паяльники імпульсного нагрівання (пістолетного типу) мають жало у вигляді петлі з товстого дроту, включеного в коло вторинної обмотки вбудованого трансформатора. Натискання на курок-вимикач вмикає трансформатор і одночасно - лампу підсвітки місця пайки; жало досягає робочої температури за 5–12 с проти 6–8 хв у паяльника безперервного нагрівання.

Потужність паяльників поділяє їх на три класи: радіомонтажні малопотужні (10–25 Вт) для пайки мікроелектроніки і тонких проводів; електротехнічні середньої потужності (40–65 Вт) для монтажу схем управління і сигналізації; мідницькі потужні (100 Вт і вище) для пайки масивних з'єднань і

мідних шин. Напруга живлення: 12, 24, 36 В (для роботи в умовах підвищеної небезпеки в приміщеннях ферм і майстерень) та 110, 220 В (для стаціонарних ділянок). Для паяльників напругою 110–220 В обов'язкове заземлення корпусу окремим захисним провідником. Робоча температура жала - 300–400 °С для стандартних типів і до 500 °С для потужних. Декодування позначення: ЕПСН-40/220 - паяльник зі змінним стрижнем, безперервного нагрівання, 40 Вт, 220 В; ЕПЦІ-65/220 - з незмінним стрижнем, імпульсного нагрівання, 65 Вт.

Прилади для зварювання поліетиленової плівки застосовуються при виготовленні і ремонті плівкових укриттів для теплиць і парників, пакувальних матеріалів. Прилад «Блискавка-1» (60 Вт, 220 В) - важільний, для дискретного шва до 210 мм - знижувальний трансформатор з ніхромовою стрічкою на вторинній обмотці; плівку затискають між стрічкою і гумовою підкладкою на 2–3 с при вмиканні. «Блискавка-2» (35 Вт) - роликівий, для безперервного шва необмеженої довжини - нагрітий полозок переміщують уздовж шва по паперовій або фторопластовій прокладці. «Блискавка-3» (80 Вт) дозволяє одночасно виконувати два види шва - обрізний (дротяний нагрівач) і зміцнений (стрічковий). Для АПК найбільш корисна «Блискавка-2» - вона дозволяє безперервно ремонтувати пошкоджені ділянки плівкових теплиць без обмеження довжини шва.

6. Правила безпечного застосування побутових електронагрівальних приладів в АПК

Безпечна експлуатація електронагрівальних приладів в умовах АПК ускладнюється специфічними чинниками: підвищена вологість у тваринницьких і рослинницьких приміщеннях, наявність горючих матеріалів (солома, сіно, торф, дерев'яні конструкції), присутність агресивних газів (аміак, сірководень) і пилу, а також часте перебування персоналу без достатнього знання правил електробезпеки. Тому вимоги до підключення і розміщення приладів тут суворіші, ніж у звичайному побуті.

Основні причини пожеж при використанні електронагрівальних приладів - пошкодження ізоляції внаслідок механічного, термічного або хімічного впливу; перевантаження побудинкової мережі (сумарне навантаження на одну розетку не повинно перевищувати 1700 Вт при 220 В, бо при перевищенні дроти перегріваються і ізоляція займається); поганий контакт у розетці або прилад - місця підвищеного перехідного опору нагріваються; розміщення приладів поблизу горючих матеріалів; залишення ввімкнених приладів без нагляду; вмикання кип'ятильників і водонагрівників без води. В умовах АПК кожна з цих причин є реальнішою, ніж у квартирі - особливо перша (механічне пошкодження кабелів сільгосптехнікою і гризунами) і четверта (солома, тирса).

Правила безпеки, обов'язкові в умовах АПК. Усі прилади повинні бути виключно заводського виготовлення і в справному стані - використання саморобних нагрівачів у виробничих приміщеннях заборонено. Усі струмоведучі частини, до яких можливе доторкання, повинні мати ізоляцію відповідного класу. Однофазні прилади з можливим пробоем на корпус підключають трижильним шнуром: два провідники (фаза і нуль) для роботи, третій - для захисного занулення корпусу. Категорично заборонено вмикати і вимикати прилади вологими руками або стоячи на вологій підлозі - у приміщеннях ферм і пральнях це особливо актуально. Заборонено одночасно торкатися електронагрівального приладу і радіаторів, труб опалення або водопроводу. У приміщеннях з підвищеною вологістю (категорія «вогкі» і «мокрі» за ПУЕ) клас захисту приладів повинен бути не нижче IP44. Електронагрівальні прилади встановлюють на вогнетривких підставках; відстань від горючих матеріалів - не менше 0,5 м. Забороняється залишати ввімкнені прилади без нагляду і заставляти їх горючими предметами. У 2024–2026 рр. актуальним є додаткове встановлення пристроїв захисного вимикання (ПЗВ) з порогом 30 мА у мережах живлення побутового обладнання приміщень АПК - це забезпечує захист від ураження струмом навіть при непомітному пошкодженні ізоляції.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть основні класи побутових електронагрівальних приладів. Які матеріали використовують для нагрівальних елементів? Порівняйте ніхром і фехраль за температурою роботи, механічними властивостями і вартістю.
2. Поясніть роботу праски з біметалічним терморегулятором. Чому подошва праски може мати різну температуру для різних видів тканин і як це реалізовано конструктивно?
3. Опишіть схему автоматики побутового водонагрівника (бойлера). Яку роль відіграє магнієвий анод і чому він потребує планової заміни?
4. Поясніть принцип нагрівання їжі в мікрохвильовій печі на молекулярному рівні. Чому в МХП не можна використовувати металевий посуд? Чому посуд від мікрохвиль безпосередньо не нагрівається?
5. У чому принципова відмінність індукційної плити від традиційної електричної? Чому ККД індукційної плити вищий? Який посуд підходить для індукційної плити і як це перевірити?
6. Порівняйте три типи електричних обігрівачів - камін, конвектор і масляний радіатор - за механізмом теплопередачі, часом розігрівання, безпекою і придатністю для приміщень АПК.
7. Поясніть різницю між паяльником безперервного і імпульсного нагрівання. У яких ситуаціях у ремонтних майстернях АПК переважно застосовується кожен тип? Що означає маркування ЕПСН-40/220?
8. Опишіть прилади серії «Блискавка» для зварювання поліетиленової плівки. Яку модель доцільно обрати для ремонту плівкових теплиць і чому?
9. Назвіть основні причини пожеж від побутових електронагрівальних приладів. Які з них особливо актуальні для умов АПК і чому?
10. Перерахуйте основні правила безпечного підключення і розміщення електронагрівальних приладів у приміщеннях АПК. Чому вимоги тут суворіші, ніж у звичайному побуті? Яку додаткову міру захисту рекомендують у 2024–2026 рр.?

Лекція 2.3

Тема: «Основи електронно-іонної технології»

ПЛАН

1. Фізичні основи ЕІТ: електрофорез, електросепарація, коронний розряд
2. Електросепаратори зерна: типи, принцип дії, підвищення посівних якостей
3. Електрофільтри для очищення повітря і газів. Установки для АПК
4. Електрофарбування і аерозольна обробка рослин в електричному полі
5. Аероіонізація повітря тваринницьких приміщень: дія на організми, режими
6. Джерела живлення ЕІТ-установок. Безпека при роботі з високою напругою

1. Фізичні основи ЕІТ: електрофорез, електросепарація, коронний розряд

Електронно-іонними технологіями (ЕІТ) називають електротехнології, в яких для зміни фізичних або хімічних властивостей речовини і цілеспрямованого розподілу її складових частин використовується дія електростатичного поля високої напруженості. В АПК ЕІТ знаходять застосування в сепарації і очищенні зерна, газоочищенні, фарбуванні техніки, аерозольній обробці рослин і тварин, аероіонізації приміщень.

Фізичну основу ЕІТ складають три явища. Електрофорез - направлений рух заряджених частинок, зважених у рідкому або газоподібному середовищі, під дією електростатичного поля. Переміщуються не окремі іони, а мікрочастинки, що складаються з великої кількості молекул. Електросепарація - відокремлення необхідних компонентів із суміші в результаті дії сильного електростатичного поля на електрично заряджену дисперговану суміш; різні частинки набувають різних зарядів і тому рухаються по різних траєкторіях. Електроосмос - рух рідини через капіляри і пористі діафрагми під дією електростатичного поля; застосовується для зневоднення торфу, осадів стічних вод, збездонення клітинної маси рослин.

Ключовим явищем для більшості ЕІТ-установок є коронний розряд - неповний електричний пробій газового середовища в різко неоднорідному електричному полі. Поле створюється між двома електродами різних розмірів: тонким коронувальним (дріт, голки, гострі краї) і масивним осаджувальним (пластина, циліндр). Через різницю радіусів кривизни напруженість поля біля коронувального електрода в сотні разів перевищує напруженість у решті міжелектродного простору. Початкова напруженість коронного розряду в повітрі: $E_0 = 30,31 \cdot (1 + 0,298/\sqrt{r})$ [МВ/м], де r - радіус коронувального електрода (м). При зростанні напруги навколо коронувального електрода утворюється зона із заряджених іонів і електронів, яка є джерелом зарядів для технологічних частинок. Основні носії зарядів при негативній короні - від'ємно заряджені іони (й меншою мірою - електрони), що рухаються до осаджувального електрода позитивної полярності.

Гранична напруга заряду частинки: $Q_{\text{ГР}} = 4\pi\epsilon_0 \cdot (1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)) \cdot E_x \cdot a^2$, де ϵ_0 - діелектрична проникність вакууму; ϵ - відносна діелектрична проникність газового середовища; E_x - напруженість поля в точці розміщення частинки; a - її радіус. Чим більша частинка і вища напруженість поля, тим більший заряд вона набуває - це і є фізичною основою розділення часток різних розмірів і властивостей.

2. Електросепаратори зерна: типи, принцип дії, підвищення посівних якостей

Якість посівного матеріалу безпосередньо визначає врожайність. Традиційні механічні зерноочисні машини (повітряно-решітні, трієрні, гравітаційні) розділяють зерно за розміром, масою і аеродинамічними властивостями, але не здатні відбрати насіння за біологічною повноцінністю - вмістом поживних речовин, ступенем стиглості, ендосперму. Електричні сепаратори зерна заповнюють цю прогалину: вони сортують зерно за діелектричною проникністю і питомою електропровідністю, які залежать від вологості, щільності, хімічного складу і ступеня стиглості.

Діелектрична проникність зерна зі збільшенням його густини і вологості зростає - тому повністю виповнене, стигле зерно набуває більший заряд у полі, ніж недозріле або щупле. Після сепарації в електростатичному полі маса 1000 зернин підвищується на 4–7 %. Багаторічні дослідження ІМЕСГ показують, що збільшення маси 1000 зернин пшениці на 1 г відповідає прибавці врожаю 1,08 ц/га. Наприклад, при базовій урожайності 35,3 ц/га прибавка від відбору 10 % найкращого зерна може досягати 5–7 ц/га.

Електросепаратори розрізняють за способом зарядження частинок: електростатичні (контактна або індукційна зарядка), електрокоронні (іонна зарядка в короні) і комбіновані. За конструкцією бувають барабанні, транспортерні, камерні і решітні. Барабанний коронний сепаратор - найпоширеніша конструкція. Зерно подається на обертовий барабан і проходить крізь зону коронного розряду між коронувальним електродом і барабаном, що виконує роль осаджувального. Кожна частинка набуває заряд, пропорційний її діелектричним властивостям. Далі в зоні розділення на неї діють: сила електростатичного притягання до барабана $F_k = 4\pi\epsilon_0 \cdot (1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)) \cdot E_x \cdot E_k \cdot a^2$, відцентрова сила $F_c = mv^2/R$ і сила тяжіння $F_g = mg$. Повноцінне зерно з більшим зарядом залишається на барабані довше і відривається далі від точки відриву, ніж легка або дрібна фракція - так суміш розподіляється по різних секціях класифікатора.

Транспортерний (конвеєрний) сепаратор відрізняється тим, що зерно рухається на горизонтальній або похилій стрічці, яка виконує роль осаджувального електрода, а коронувальний електрод розміщений над нею. Вздовж зони розділення класифікатор збирає фракції у відповідні секції. Барабанні сепаратори ЕЗМ-Б-2 мають продуктивність до 2 т/год (овес) і до 3,5 т/год (пшениця) при очищенні насіннєвого матеріалу. Діелектричний сепаратор - барабан із діелектрика з біфілярною обмоткою з ізолюваного проводу, що створює неоднорідне поле між сусідніми різнойменно зарядженими електродами. Сила, що діє на насіння у нерівномірному полі, визначається градієнтом квадрата напруженості і залежить від ϵ матеріалу насіння. Камерний

сепаратор - вертикальна камера між пластинчастим заземленим і сітчастим високовольтним електродами. Зерно вільно падає між ними, набуваючи різні заряди; відхилення від вертикалі електричною силою $F_k = Q \cdot E$ різне для різних фракцій.

3. Електрофільтри для очищення повітря і газів. Установки для АПК

Електрофільтри - найефективніші апарати для очищення газів і повітря від твердих і рідинних частинок. Ступінь очищення досягає 99,95 %, діапазон уловлюваних часток - від 0,01 мкм (тютюновий дим, вірусні аерозолі) до десятків мікрометрів. Гідравлічний опір низький - близько 2 кПа - що забезпечує невеликі витрати на прокачування газу. Принцип дії: забруднене повітря надходить між коронувальним і осаджувальним електродами; при напрузі між ними 50–150 кВ постійного струму утворюється стійка корона; більшість частинок набуває негативного заряду і рухається до позитивно зарядженого (або заземленого) осаджувального електрода; очищений газ виходить з фільтра.

В сухих електрофільтрах осаджений пил видаляється механізмами струшування (зазвичай ударно-молоткового типу) і збирається в бункер. В мокрих - поверхня електрода промивається рідиною або осад стікає самопливом. Для АПК особливо важливі компактні установки для очищення повітря малооб'ємних приміщень (інкубаторів, лабораторій, кімнат для персоналу). Іонний вентилятор-фільтр (ІВФ) і електростатичний фільтр (ЕСФ) розроблені в ЧГАУ для таких застосувань. ЕСФ є набором паралельних пластин з діелектрика, на які подається постійна висока напруга: потенційні і заземлені осаджувальні пластини чергуються, осаджуючи частинки з природним зарядом - для цього типу фільтра окрема зона іонної зарядки непотрібна. Для зерноховищ і елеваторів промислова серія ЗГБМ призначена для очищення аспіраційного повітря від зернового та борошняного пилу, що забезпечує дотримання норм ГДК і запобігає вибухонебезпечному накопиченню зависів. У 2024–2026 рр. в Україні електрофільтри набувають нового значення для пташників і свинарників: жорсткіші ветеринарно-санітарні вимоги і фітосанітарні нормативи

ЄС (в контексті євроінтеграції) вимагають зниження бактеріального і пилового навантаження.

4. Електрофарбування і аерозольна обробка рослин в електричному полі

Електронно-іонне фарбування базується на зарядженні дрібних краплин лакофарбового матеріалу і їх направленому осадженні на поверхню виробу в електростатичному полі. Між заземленим виробом (осаджувальний електрод) і фарборозпилювачем (коронувальний електрод) прикладається напруга 60–140 кВ. Заряджені краплини переміщуються вздовж силових ліній поля і рівномірно осідають по всій поверхні виробу, включаючи поверхні, не видимі з боку розпилювача (ефект «обтікання»). Втрати лакофарбового матеріалу - лише 5–10 % проти 40–60 % при звичайному пульверизаційному фарбуванні. Покриття рівномірне, без патьоків і пропусків. Відсутність «туманоутворення» суттєво покращує санітарно-гігієнічні умови. Коефіцієнт перенесення матеріалу для сучасних фарбопультів PRO Xs (Graco) - 90–95 %.

Недоліком є неможливість повного фарбування глибоких западин і внутрішніх порожнин (силові лінії поля туди не проникають), підвищені вимоги до складу лакофарбового матеріалу і висока вартість установок. Для ремонтних майстерень АПК електростатичне фарбування особливо виправдане при відновленні кузовів і рам - великі рівні поверхні ефективно рівномірно покриваються з мінімальними втратами матеріалу.

Аерозольна обробка рослин і тварин в електричному полі - технологія, що підвищує ефективність застосування пестицидів, добрив і лікарських препаратів. Заряджений аерозоль (краплини 10–50 мкм) розпорошується в рослинному пологу. Оскільки аерозоль несе уніполярний заряд, він наводить на листках і стеблах заряд протилежного знаку (дзеркальна сила), тому краплини притягуються і до верхньої, і до нижньої поверхні листка - дозволяє досягати рівномірного покриття, недоступного для звичайного механічного розпилення. Знесення вітром суттєво зменшується, а витрата хімікатів знижується в 2 рази

порівняно з традиційною аерозольною технологією. Для дезінфекції і дезінсекції тваринницьких приміщень заряджені аерозолі дезінфектантів забезпечують проникнення у важкодоступні щілини і кути.

5. Аероіонізація повітря тваринницьких приміщень: дія на організми, режими

Аероіони - позитивно і негативно заряджені іони у повітрі - є невід'ємним компонентом природного повітряного середовища. Для нормальної життєдіяльності людей і тварин у 1 см³ повітря повинно міститися близько 1000 легких негативних іонів. Доведено, що саме легкі негативні іони (аероіони, що утворюються під дією космічних променів, радіонуклідів ґрунту і гроз) справляють сприятливу фізіологічну дію, підвищують тонус нервової системи, стимулюють імунітет. У закритих тваринницьких приміщеннях зовнішнє повітря при проходженні через вентиляційну систему втрачає до половини легких іонів, що осідають на стінках трубопроводів і поглинаються живими організмами. Виникає «аероіонне голодування», що призводить до зниження продуктивності, підвищення захворюваності і передчасного старіння тварин.

Для штучної аероіонізації застосовують коронувальні електроди - металеву сітку з голками - на які подається постійна напруга 35–50 кВ негативної полярності (позитивний полюс заземлений). При режимі тихого коронного розряду генеруються легкі від'ємні іони без небажаного озону і оксидів азоту. Оптимальне розміщення іонізаторів - на виходах повітроводів вентиляційних установок: іони рівномірно розподіляються потоком повітря по всьому приміщенню. Для інкубаторів промисловість випускає аероіонізатор ІЗ-1 (напруга 5 кВ, голчасті електроди з резисторів МЛТ-10 на 3,6 МОм для забезпечення безпеки).

Режими аероіонізації суттєво різняться для різних видів тварин і птиці. Для телят до місяця - щоденно по 6–8 год при концентрації $(2-3) \cdot 10^5$ іон/см³. Для дійних корів - 15–20 днів по 5–8 год на добу при тій же концентрації з наступною перервою 20–30 діб. Для свиней - концентрація $(3-5) \cdot 10^5$ іон/см³, 3–4 тижні два

рази на добу по 30 хв з повторенням через місяць. Для курчат яйценосних порід - 2 місяці при $(2-2,5) \cdot 10^4$ іон/см³, 5-денні курси з перервами такої ж тривалості. Для бройлерів до 18-денного віку - сеанси по 30 хв при $(6-7) \cdot 10^4$ іон/см³, потім поступово збільшувати до 3 год. Для курей-несучок - місячними циклами по 4-12 год/добу при $(1-2,5) \cdot 10^4$ іон/см³. Гранично допустима концентрація аероіонів - 10^6 іон/см³. Крім фізіологічного ефекту, аероіонізація знижує вміст пилу і мікроорганізмів у повітрі приміщення, оскільки заряджений пил швидше осідає на стінах і підлозі, що позитивно впливає на стан поголів'я.

6. Джерела живлення ЕІТ-установок. Безпека при роботі з високою напругою

Установки ЕІТ потребують джерел постійного струму з вихідною напругою 10-150 кВ при малій потужності (до кількох кВт). Наростання напруги реалізується каскадними схемами множення напруги на діодах і конденсаторах. В однонапівперіодній схемі множення на n каскадів напруга холостого ходу: $U_{xx} = 2n \cdot U_{2m}$, де U_{2m} - амплітуда напруги вторинної обмотки трансформатора. При струмі навантаження I спад напруги: $\Delta U = I \cdot (4n^3 + 3n^2 + 2n) / (6fC)$, де f - частота мережі, C - ємність конденсаторів. Типова схема: підвищувальний трансформатор → каскадний випрямляч → навантаження (електроди установки). Конденсатори схеми повинні мати номінальну напругу не менше $2,85U_2$. Зворотна напруга діодів - те саме значення. Схема повинна мати захист від коротких замикань (може виникнути при перекритті повітряного проміжку і при замиканні технологічних об'єктів на заземлений електрод).

Безпека персоналу при роботі з установками ЕІТ потребує особливої уваги через значні напруги (10-150 кВ), смертельно небезпечні навіть при малих струмах. Обов'язкові заходи: всі елементи установки, що знаходяться під напругою, розміщують у закритих захисних корпусах з блокувальними вимикачами, що розривають коло при відкриванні кожуха, кришки або дверей; після зняття напруги елементи установки автоматично замикаються на землю - залишковий заряд конденсаторів є небезпечним навіть після відключення від

мережі. Корпус установки заземлюють незалежно від способу підключення. Забороняється наближатися до відкритих струмовідних частин на відстань менше безпечної, яка при напрузі 100 кВ становить не менше 1,5 м. Обслуговування установок ЕІТ виконується лише кваліфікованим електроперсоналом з групою допуску не нижче IV (для установок понад 1 кВ). Роботи в умовах аерозольної обробки полів вимагають дотримання часового розриву між обробкою і перебуванням людей на полі відповідно до регламенту застосованого препарату.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте визначення електронно-іонних технологій. Назвіть три фізичних явища, що лежать в їх основі. Чим електрофорез відрізняється від звичайного електричного струму?

2. Що таке коронний розряд? Від якого параметра електродів залежить його виникнення? Чому для коронного розряду потрібна різко неоднорідна геометрія електродів?

3. Поясніть, чому зерно після електросепарації має вищу масу 1000 зернин і вищу схожість. Як це пов'язано з діелектричними властивостями зерна?

4. Опишіть принцип роботи барабанного коронного сепаратора зерна. Назвіть сили, що діють на частинку зерна в зоні розділення. Від чого залежить, в яку секцію класифікатора потрапить та чи інша частинка?

5. Порівняйте камерний і діелектричний електросепаратори зерна за принципом зарядження частинок і конструктивними особливостями. Для яких завдань кожен є оптимальним?

6. Назвіть переваги електрофільтрів порівняно з механічними очисниками повітря. Який ступінь очищення і мінімальний розмір частинок уловлює промисловий електрофільтр? Де в АПК це критично важливо?

7. Поясніть ефект «обтікання» при електронно-іонному фарбуванні. Чому витрати лакофарбового матеріалу знижуються до 5–10 %? Які поверхні важко зафарбувати цим методом?

8. Чому при аерозольному обприскуванні рослин заряджені краплини осідають і на нижній поверхні листка? Яку економію пестицидів це дає? Як зменшується знесення вітром?

9. Яка концентрація легких негативних іонів є нормою для тваринницьких приміщень? Чому в закритих приміщеннях виникає «аероіонне голодування»? Опишіть режим аероіонізації для дійних корів.

10. Запишіть формулу для напруги холостого ходу каскадного помножувача. Які заходи безпеки є обов'язковими для всіх установок ЕІТ? Чому небезпечно наближатися до установки навіть після відключення від мережі?

Лекція 2.4

Тема: «Електричні іонізатори повітря та обробка електричним струмом»

ПЛАН

1. Іонізатори повітря: дія аероіонів, конструкція, режими в АПК
2. Електроліз у технологічних процесах АПК: дезінфекція, гальванопокриття, очищення води
3. Електроплазмоліз рослинної сировини та обробка кормових матеріалів
4. Передпосівна електроактивація насіння і мікрохвильова обробка
5. Боротьба з бур'янами і розсолення ґрунту електричним струмом
6. Електромагнітна обробка: магнітна сепарація насіння, очищення кормів, обробка води

1. Іонізатори повітря: дія аероіонів, конструкція, режими в АПК

Іонізований стан повітря є невід'ємною характеристикою природного середовища. Для нормальної фізіологічної активності людей і тварин у 1 см³ повітря повинно міститися близько 1000 легких негативних аероіонів. Їх джерелами в природі є космічні промені, радіонукліди ґрунту, грозові розряди. Доведено, що легкі негативні іони підвищують тонус нервової системи, активізують імунітет, стимулюють обмін речовин у живих організмах; тривале

перебування без них призводить до передчасного старіння і підвищення захворюваності.

У закритих тваринницьких і птахівничих приміщеннях зовнішнє повітря при проходженні через вентиляційну систему втрачає до 50 % легких іонів - вони осідають на стінках трубопроводів і поглинаються живими організмами. Виникає «аероіонне голодування». Для штучної іонізації застосовують коронувальні генератори іонів - металеві голки або сітку, на які подається постійна напруга 35–50 кВ негативної полярності при заземленому позитивному полюсі. При режимі тихого коронного розряду генеруються легкі від'ємні іони без небажаного озону і оксидів азоту. Інтенсивність коронного розряду і, відповідно, продуктивність іонізатора регулюється напругою і конструкцією голчастих електродів. Для безпеки обслуговуючого персоналу голчасті електроди аероіонізатора ІЗ-1 (для інкубаторів) виконані з резисторів МЛТ-10 на 3,6 МОм - це обмежує струм короткого замикання до безпечного рівня.

Оптимальне розміщення іонізаторів - на виходах вентиляційних повітроводів, що забезпечує рівномірний розподіл іонів по всьому об'єму приміщення. Ефективні режими суттєво різняться для різних видів тварин і птиці. Для телят до місяця - щоденно по 6–8 год при концентрації $(2-3) \cdot 10^5$ іон/см³; для дійних корів - 15–20 днів по 5–8 год/добу при тій самій концентрації, з перервою 20–30 діб. Для поросят і свиней рекомендована концентрація $(3-5) \cdot 10^5$ іон/см³, обробка двічі на добу по 30 хв протягом 3–4 тижнів з повторенням через місяць. Для курчат яйценосних порід - 2 місяці при $(2-2,5) \cdot 10^4$ іон/см³ п'ятиденними курсами з паузами. Для курей-несучок - місячні цикли по 4–12 год/добу при $(1-2,5) \cdot 10^4$ іон/см³. Інкубатори рекомендують аероіонізувати цілодобово 19 днів при $1,3 \cdot 10^4$ іон/см³. Граничне допустиме значення концентрації аероіонів - 10^6 іон/см³. Крім фізіологічного ефекту, аероіонізація знижує бактеріальне і пилове навантаження на повітря: заряджені частинки пилу і мікроорганізми швидше осідають, що знижує захворюваність поголів'я.

2. Електроліз у технологічних процесах АПК: дезінфекція, гальванопокриття, очищення води

Електроліз - це сукупність окислювально-відновних процесів, що відбуваються на електродах при проходженні постійного струму через електроліт. В АПК він знаходить три основних напрями застосування: виробництво дезінфікуючих розчинів, нанесення гальванічних покриттів і очищення води.

Отримання дезінфікуючого розчину безпосередньо на фермі є виключно практичним застосуванням електролізу. Установа ЕДР-0,1 містить 20 л 5 % розчину кухонної солі NaCl, через який подається постійна напруга 24 В від випрямляча ВСА-6К. На катоді відновлюються іони H^+ з утворенням водню, на аноді окислюються іони Cl^- з утворенням хлору. Хлор, розчиняючись у воді, утворює хлорновату кислоту $HClO$ і соляну HCl , а хлорновата кислота взаємодіє з їдким натром $NaOH$ (що утворюється на катоді) з утворенням гіпохлориту натрію $NaOCl$. Хлорновата кислота і гіпохлорит є сильними окислювачами - саме вони забезпечують дезінфікуючу дію. На отримання 1 кг активного хлору витрачається 8–10 кг солі і 5,5–7 кВт·год електроенергії; потужність установки - 350–600 Вт. Порівняно з використанням готових реагентів такий підхід усуває труднощі транспортування і зберігання токсичних речовин.

Нанесення гальванічних покриттів в ремонтному виробництві АПК є методом відновлення зношених деталей і захисту від корозії. Деталь-катод і розчинний анод занурюють у ванну з електролітом (розчин солей металу, що осаджується). При постійній напрузі 2–48 В позитивно заряджені іони металу рухаються до катода і осідають на поверхні деталі. Найпоширеніші процеси - хромування (твердий захисний шар, відновлення розмірів) і залізнювання (залізо-марганцеве покриття для відновлення діаметрів); густини струму - кілька тисяч ампер на квадратний метр. Переваги перед наплавленням: можливість одночасного відновлення великої кількості деталей, відсутність теплового і механічного впливу на відновлювану деталь, висока точність товщини покриття.

Для комплексного очищення питної води на фермах і пасовищах застосовують установку УВ-0Д, що об'єднує: фільтр-електролізер для електрокоагуляції - анодне розчинення алюмінію або заліза з утворенням гідроксиду $Al(OH)_3$ або $Fe(OH)_3$, що поглинає зважені частинки; гіпохлоритний електролізер для знезараження (аналогічно ЕДР-0,1); срібний електролізер для консервування - вода, оброблена іонами срібла, зберігає бактерицидні властивості більше місяця. Добова продуктивність - близько 10 м^3 , потужність - $2,5 \text{ кВт}$. Оптимальна густина струму при електрокоагуляції - $10\text{--}40 \text{ А/м}^2$, міжелектродна відстань - $10\text{--}12 \text{ мм}$. Для опріснення підземних або засолених вод на пасовищах і у засушливих зонах застосовують електродіаліз - перенесення іонів солей через іоноселективні мембрани під дією постійного поля. Вітчизняні установки ЕОСХ-2М (продуктивність $3,5 \text{ м}^3/\text{год}$, питомі витрати $2,3 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$) призначені для опріснення з вихідною мінералізацією до 7 г/л .

3. Електроплазмоліз рослинної сировини та обробка кормових матеріалів

Плазмоліз - відшарування протопласта клітини від її оболонки зі стисненням протоплазми. Після загибелі клітини рідина, що в ній біологічно утримувалась, переходить у вільний стан і виходить у міжклітинний простір. Електроплазмоліз - досягнення плазмолізу дією електричного струму - суттєво прискорює видалення вологи з рослинних тканин і збільшує вихід соку при механічному пресуванні. Застосовують змінний струм промислової або підвищеної частоти та імпульси постійної полярності (постійний струм не застосовують через ризик хімічного розкладання продукту).

Найпоширеніший апаратурний тип - валковий електроплазмолізатор: два металевих валки-електроди, що обертаються назустріч один одному. Рослинна сировина (трава, плоди) проходить між валками, піддаючись дії електричного поля і одночасному механічному плющенню. Для підготовки трав до сушіння електроплазмоліз поєднують зі скошуванням у польових умовах. В установці (на базі косарки КПВ-3,0) трава проходить під електродом розрядника, потім через

плющильні вальці. Іскровий розряд пробиває зовнішній шар стебла; струм руйнує живі клітини (особливо серцевини, де утримується найважче видалювана волога); механічне плющення утворює поздовжні тріщини для виходу вологи. Напруженість поля в зоні обробки - 60–75 кВ/м. Порівняльні випробування показали: тривалість природного сушіння трави зменшується в 1,3–2 рази; вміст каротину при кінцевій вологості 18 % - на 50 % вищий; продуктивність сушильного агрегату при штучному сушінні зростає на 16–50 %; загальні витрати енергії знижуються на 10–40 %. Витрата електроенергії на електроплазмоліз - 1,7–2,1 кВт·год/т початкової маси.

Обробка вологих кормових матеріалів електричним струмом спрямована на підвищення перетравності і знезараження. Подрібнену солому, зволожену 2 % содово-сольовим розчином, обробляють у електродних камерах змінним струмом низької частоти 6–8 хв при густині струму $(0,1-0,3) \cdot 10^4$ А/м². Результат: вміст кормових одиниць підвищується в 1,5–2 рази, бактеріальна забрудненість знижується у стільки ж разів. Обробка фуражного зерна підвищує перетравність і засвоюваність на 10–15 %. Стерилізацію ґрунту в теплицях проводять електродним способом до глибини 0,25 м (у теплицях) або 0,12–0,15 м (у парниках): фітопатогенні гриби гинуть при 55–65 °С.

4. Передпосівна електроактивація насіння і мікрохвильова обробка

Передпосівна обробка насіння спрямована на активізацію фізико-хімічних реакцій, що прискорює проростання, підвищує інтенсивність фотосинтезу і стійкість рослин до несприятливих умов. Один з найдоступніших методів - обробка насіння електричним полем промислової частоти. Установка: насіння з бункера подається елеватором у робочу камеру з металевими ізольованими електродами, між якими трансформатор підтримує напруженість поля 1–4 кВ/см. Насіння рухається під дією сили тяжіння, а тривалість обробки регулюється продуктивністю вивантажувального пристрою. За даними ВІЕСГ, обробка зернових при напруженості 2–4 кВ/см і тривалості 10–120 с підвищує

урожайність на 10–20 %. Витрата електроенергії - не більше 0,2 кВт·год/т, що робить метод економічно незаперечним.

Мікрохвильова обробка насіння є більш сучасним і потужнішим методом. Дослідження УНТЦ і Селекційно-генетичного інституту УААН підтвердили: мікрохвильове поле (частота 2450 МГц) стимулює процеси біосинтезу, пригнічує фітопатогени і складських комах без застосування пестицидів. Реакція різних культур суттєво відрізняється: найчутливіші овочеві культури (урожай +до 450 % від контролю), далі зернобобові (+до 51 %), круп'яні (+до 25 %), олійні (+до 21 %), злакові (+3–32 % і більше). Позитивний ефект зберігається 3–5 і більше місяців, що дозволяє проводити обробку задовго до сівби. Некондиційне насіння після обробки нерідко переходить у категорію кондиційного - це прямий економічний результат. Мікрохвильова установка «Мікростим 1» (2 магнетрони по 1500 Вт, частота 2450 МГц, рідинне охолодження) має продуктивність 900–1200 кг/год. Багатофункціональна установка КТ-3 (потужність до 5 кВт, продуктивність 1000 кг/год) поєднує передпосівну обробку, холодну пастеризацію, дезінсекцію і сушіння. Вміст нітратів після обробки зменшується в 2–3 рази, каротину і цукру - зростає на 10–20 %, схожість підвищується на 18 % і більше.

5. Боротьба з бур'янами і розсолення ґрунту електричним струмом

При досить великій густині струму в рослинній тканині електричний вплив стає пригнічуючим - клітини гинуть. Цей ефект використовують для боротьби з бур'янами без хімічних гербіцидів. Мобільна установка на базі трактора: від вала відбору потужності обертається генератор, підключений до первинної обмотки підвищувального трансформатора. Навісні електроди (пластини і стрижні, ширина захвату 50–55 см) переміщуються над ґрунтом і проводять струм через надземну частину бур'янів; заземлені електроди (катки) рухаються в ґрунті або по його поверхні. Оптимальні умови: напруга між електродами 2–5 кВ, швидкість переміщення 1–4 км/год, обробляти в фазу старіння бур'янів при підсохлому верхньому шарі ґрунту (опір рослинної тканини мінімальний, опір

грунту максимальний - струм тече через рослини, а не через ґрунт). Засміченість ділянок знижується на 80–90 % при витраті 20–90 кВт·год/га. У 2024–2026 рр. цей метод привертає підвищену увагу в контексті переходу до органічного землеробства і скорочення хімічного навантаження на агроєкосистеми.

Розсолення засолених ґрунтів електричним струмом - метод електромеліорації, що суттєво прискорює і здешевлює традиційне промивання прісною водою. В ґрунт по рядах забивають аноди (глибина 0,6–1,8 м) і катоди (3–5 м), між рядами - відстань 20–110 м, між однойменними електродами в ряду - 10–20 м. Після заповнення чеків водою на лінії електродів подають постійну напругу; густину струму в ґрунті підтримують 1–10 А/м². Електроосмос прискорює фільтраційне переміщення розчинів до катода; електроліз змінює рН середовища, збільшуючи розчинність токсичних солей. Витрата електроенергії - 5–20 тис. кВт·год/га. Порівняно з традиційним промиванням: скорочення терміну меліорації в кілька разів, зменшення витрати прісної води приблизно вдвічі. Це важливо в умовах зрошуваного землеробства півдня України.

6. Електромагнітна обробка: магнітна сепарація насіння, очищення кормів, обробка води

Магнітна сепарація насіння заснована на різниці властивостей поверхні насіння культурних рослин і бур'янів. Насіння перед очищенням змішують з феромагнітним порошком. До гладенької поверхні насіння культурних рослин порошок не пристає, а шорстка поверхня насіння бур'янів (повитиця, подорожник, плевел) добре його утримує. Оброблена суміш надходить на поверхню латунного барабана, що обертається, з вбудованим нерухомим електромагнітом, який займає половину внутрішньої поверхні. Насіння бур'янів з прилиплим порошком затримується у зоні дії магніту і потрапляє в один бункер; насіння культурних рослин скочує з барабана раніше - в інший. Машина ЕМС-1А призначена для очищення насіння проса і дрібнонасінних багаторічних трав.

Магнітне очищення кормів від металевих предметів є обов'язковою операцією кормоцехів тваринницьких підприємств. Металеві включення (цвяхи, дрiт, болти) потрапляють у корм разом із зерном і сіном при збиранні і транспортуванні. Проковтнуті тваринами, вони можуть травмувати шлунок і спричинити загибель. Корм тонким шаром переміщують під полюсами електромагнітів або постійних магнітів - металеві предмети притягуються і видаляються. Для великої рогатої худоби додатково застосовують електромагнітний стрижень, який вводять через рот у шлунок тварини для витягування металевих предметів.

Магнітна обробка води перед подачею в котли і водонагрівачі запобігає відкладанню накипу. Вода із швидкістю 0,4–1 м/с проходить через апарат зі змінною полярністю магнітного поля (катушка електромагніту в металевому корпусі, зазор між кожухом і корпусом не більше 10 мм). При проходженні через поле у воді утворюються центри кристалізації солей, тому при нагріванні такої води солі кристалізуються і осідають на дно, а не на стінки котла. Вимоги: жорсткість води не більше 12–14 мг·екв/л, вміст солі - до 1100 мг/л, температура - 60–70 °С. При збільшенні зазору понад 10 мм ефективність різко знижується через зростання опору магнітного поля. Вода, оброблена магнітним полем, також підвищує енергію проростання і урожайність цукрового буряку, рису, гороху та овочів при поливанні.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть механізм «аероіонного голодування» у тваринницьких і птахівничих приміщеннях. Чому концентрація легких іонів у закритих приміщеннях значно менша, ніж зовні? Яка нормативна концентрація і граничне допустиме значення?

2. Опишіть конструкцію електричного іонізатора повітря і принцип генерування від'ємних аероіонів. Чому для безпеки голчасті електроди іонізатора ІЗ-1 виконані з резисторів МЛТ на 3,6 МОм?

3. Запишіть хімічні реакції при електролізі розчину кухонної солі. Які речовини утворюються і чим зумовлена їх дезінфікуюча дія? Яка перевага над готовими реагентами (хлорне вапно, рідкий хлор)?

4. Опишіть принцип нанесення гальванічних покриттів при відновленні деталей. Чому деталь підключають як катод, а не анод? Назвіть переваги гальванопокриттів перед наплавленням.

5. Що таке електроплазмоліз? Поясніть, чому руйнування живих клітин рослини прискорює сушіння трави. Яких результатів досягають при поєднанні електроплазмолізу з природним і штучним сушінням?

6. Опишіть установку для передпосівної обробки насіння електричним полем промислової частоти. Які значення напруженості поля і тривалості обробки дають приріст урожайності 10–20 %? Яка витрата електроенергії?

7. Назвіть ефекти, що спостерігаються при мікрохвильовій обробці насіння. Які культури найбільш чутливі? Як довго зберігається позитивний ефект і яке це має практичне значення для сівби?

8. Поясніть принцип електричної боротьби з бур'янами. Чому обробку потрібно проводити при підсохлому верхньому шарі ґрунту і в фазу старіння бур'янів? Чому цей метод актуальний в 2024–2026 рр.?

9. Поясніть принцип електромеліорації - розсолення ґрунту постійним струмом. Яку роль відіграють електроосмос і електроліз у цьому процесі? Порівняйте з традиційним промиванням.

10. Опишіть принцип магнітної обробки води перед котлами. Чому при обробці в полі зі змінною полярністю солі осідають на дно, а не на стінки? Які вимоги до якості оброблюваної води і розміру зазору?

Лекція 2.5

Тема: «Електроімпульсна техніка і технологія»

ПЛАН

1. Класифікація імпульсних електротехнологій. Загальна характеристика
2. Ультразвук: фізичні основи, перетворювачі, застосування в АПК
3. Ультразвукове очищення деталей та інші застосування в аграрному виробництві
4. Електрогідравлічний ефект: принцип дії, параметри, застосування
5. Магнітно-імпульсні установки: принцип дії та технологічне застосування
6. Електричні огорожі для загінного випасання тварин

1. Класифікація імпульсних електротехнологій. Загальна характеристика

Імпульсні технології електрофізичної обробки поділяють на три групи: ультразвукові, електрогідроімпульсні та магнітно-імпульсні. До цього ж напряму відносять електричні огорожі. Принцип дії кожної групи базується на різних фізичних явищах, але загальною ознакою є імпульсний характер силової дії на об'єкт обробки. Принципово важливою особливістю імпульсних технологій є те, що в момент імпульсу потужність на об'єкт може в тисячі разів перевищувати потужність джерела живлення - це досягається накопиченням енергії в проміжку між імпульсами (як правило, у конденсаторній батареї). Для АПК ці технології використовуються при очищенні деталей і доїльного обладнання, обробці і зміцненні заготовок, подрібненні добрив і кормів, обробці рідин (вода, молоко, стічні води), відлякуванні гризунів і управлінні випасанням.

2. Ультразвук: фізичні основи, перетворювачі, застосування в АПК

Ультразвук - це механічні пружні коливання з частотою від $2 \cdot 10^4$ до 10^{10} Гц, тобто вище верхньої межі слухового сприйняття людини (~ 20 кГц). Умовно розрізняють низькочастотний ультразвук (до 100 кГц) і високочастотний (понад 100 кГц); слабкої інтенсивності (до 10 Вт/м²) і потужний (до 10^6 – 10^7 Вт/м²). Довжина хвилі: $\lambda = C/f$, де C - швидкість поширення звуку в середовищі. У металах $C = \sqrt{E/\rho}$, де E - модуль Юнга, ρ - щільність; у рідинах і газах $C = 1/\sqrt{\beta\rho}$, де β - стисливість. Поширення ультразвукової хвилі в середовищі

супроводжується акустичним (пружні коливання), механічним (тиск і мікропотоки), термічним (локальний нагрів) та біологічним проявами.

Генерування ультразвуку відбувається в два етапи. Спочатку електрогенератор перетворює промислову частоту 50 Гц у струм ультразвукової частоти; потім електроакустичний перетворювач перетворює електричну енергію в механічні коливання. Застосовують два типи перетворювачів. Магнітострикційний перетворювач використовує явище поздовжньої магнітострикції - зміну довжини феромагнетиків (нікель, пермендюр, альфер) при зміні магнітного поля. Сердечник перетворювача перебуває у підмагнічувальному постійному полі (для стабільності знаку деформації) та змінному полі від генератора ультразвукової частоти - їх суперпозиція зумовлює коливання довжини сердечника на частоті генератора. Відносна деформація мала (0,001–0,1 % довжини), тому обов'язково застосовують концентратор-підсилювач (конічний, ступеневий або експоненційний), що збільшує амплітуду коливань у кілька разів. П'єзоелектричний перетворювач використовує обернений п'єзо ефект - зміну розмірів кристалів (цирконат-титанат свинцю ЦТС-19, кераміка барію ВаТіО₃) в електричному полі. Пакет п'єзопластин між металевими накладками стискається гвинтами; при подачі змінної напруги пакет коливається. ККД п'єзоперетворювачів вищий, ніж магнітострикційних, але механічна міцність пластин обмежує максимальну питому потужність 1–2 Вт/см². Тому п'єзоперетворювачі застосовують у вимірювальній техніці і малопотужних установках очищення, а магнітострикційні - у потужних установках.

3. Ультразвукове очищення деталей та інші застосування в аграрному виробництві

Ультразвукове очищення - найбільш поширене промислове застосування ультразвуку, що широко використовується в ремонтному виробництві АПК для очищення деталей двигунів, вузлів трансмісії і доїльного обладнання. Принцип заснований на явищі кавітації: в рідині під дією ультразвукових коливань у фазі

розрідження утворюються мікропорожнини (бульбашки), що у фазі стиснення стрімко схлопуються, генеруючи локальні пікові тиски до десятків МПа. Кавітаційні бульбашки проникають під плівку забруднення, відривають і диспергують її. При цьому не потрібні токсичні або пожежонебезпечні розчинники - достатньо слабого водного розчину тринатрійфосфату, силікату натрію або сульфанолю при температурі 60–80 °С.

Ефективність очищення: при простому прополіскуванні на поверхні залишається до 88 % забруднень, при вібраційному - близько 55 %, при ручному - близько 20 %, при ультразвуковому - не більше 0,5 %. Для кавітаційного очищення оптимальні низькі частоти 18–22 кГц, при яких кавітація настає при порівняно невисокій інтенсивності (2,5–10 Вт/см²). Промисловість випускає установки різних типів: транзисторні УЗУ-0,25 (потужність 0,25 кВт, частота 18 кГц), УЗГ-10-1,6 (1,6 кВт); тиристорні УЗГ-2-4 (4 кВт), УЗГ-1-10/22 (10 кВт, частота 22 кГц). В установці УЗУ-0,25 три п'єзопакети з ЦТС-19 вмонтовані в дно ванни.

Інші застосування ультразвуку в АПК охоплюють широкий діапазон задач. Пастеризація і гомогенізація молока ультразвуком вищої інтенсивності (100 кГц і вище) дозволяє дезактивувати мікроорганізми без високотемпературної обробки, зберігаючи термолабільні вітаміни. Ультразвукова дефектоскопія зварних швів, болтових з'єднань і деталей ходової частини тракторів дозволяє виявляти внутрішні тріщини і раковини без руйнівного контролю - це є обов'язковою складовою технічного огляду відповідального обладнання. Ультразвукові прилади визначають товщину шпику у живих свиней (ультразвуковий зонд прикладають до поверхні тіла), що є стандартним методом прижиттєвої оцінки м'ясних якостей тварин у племінній роботі та при контрольному відгодовуванні. Ультразвуковий пристрій «Сирена» відлякує мишей, щурів і полівок зі складів зерна: два генератори (один ультразвуковий 20–40 кГц, другий - модулятор 5–15 Гц) створюють частотно-модульований сигнал. Перемикач SA1 змінює параметри генераторів (2–3 рази на тиждень), щоб гризуни не адаптувалися до сигналу.

4. Електрогідравлічний ефект: принцип дії, параметри, застосування

Електрогідравлічний ефект (ЕГЕ) - перетворення електричної енергії в механічну при високовольтному імпульсному розряді в рідинному середовищі. В схемі генератора ЕГЕ: підвищувальний трансформатор TV → діод VD → накопичувальний конденсатор С → повітряний іскровий розрядник FV → робочий проміжок у рідині. Конденсатор поступово заряджається до напруги 30–70 кВ. При досягненні порогового значення пробиваються розрядник і робочий проміжок - конденсатор розряджається через плазму каналу розряду. В плазмі температура досягає близько 10^4 К; миттєве розширення плазми і розкладання молекул води генерують потужну ударну хвилю, що поширюється в рідині як зона стиснення. Потужність імпульсу тиску на фронті ударної хвилі в тисячі разів перевищує потужність джерела живлення - завдяки накопиченню енергії між імпульсами.

Параметри ЕГЕ-установок: напруга заряду конденсатора 30–70 кВ; ємність конденсаторної батареї 10–1500 мкФ; індуктивність розрядного кола $(1-10) \cdot 10^{-6}$ Г; максимальна сила струму $I_m = 0,4 \cdot U_1 \cdot \sqrt{C/L}$, де U_1 - напруга, В; С - ємність, Ф; L - індуктивність, Г; струм розряду 15–50 кА; миттєва потужність імпульсу - до 200 МВт; енергія одного імпульсу 1–300 кДж; частота імпульсів - до 2 Гц. ККД прямого перетворення електроенергії в механічну досягає 50 %.

Застосування ЕГЕ в АПК різноманітне. Електрогідравлічні дробарки використовуються для подрібнення важкорозчинних мінеральних добрив (вапняк, фосфорити) - ударна хвиля руйнує кристалічну структуру мінералів, підвищуючи їх доступну поверхню і ефективність використання рослинами. Електроімпульсні насоси без рухомих частин відрізняються простотою і надійністю. Обробка рідин (вода для поливу, молоко, стічні води ферм) в полі ударної хвилі інактивує мікроорганізми - це засноване на бактерицидній дії ЕГЕ. Поливання рослин водою, обробленою ЕГЕ, підвищує врожайність. Електрогідравлічні установки застосовуються також для миття вовни, очищення фільтрів артезіанських свердловин (відновлення дебіту). В ремонтному

виробництві ЕГЕ-штампування дозволяє деформувати листові заготовки складної форми без дорогих механічних пресів; запресування труб у решітках теплообмінників - з міцністю з'єднання на 20–30 % вищою, ніж при механічному запресуванні, і в десятки разів вищою продуктивністю.

5. Магнітно-імпульсні установки: принцип дії та технологічне застосування

Магнітно-імпульсна установка (МІУ) перетворює електричну енергію конденсаторної батареї в енергію імпульсного магнітного поля, що зумовлює пластичну деформацію струмопровідного матеріалу. Принципова схема: підвищувальний трансформатор $T \rightarrow$ випрямляч $V \rightarrow$ резистор R (обмеження струму) \rightarrow батарея імпульсних конденсаторів $C \rightarrow$ комутаційний апарат $S \rightarrow$ обмотка індуктора. При замиканні S через індуктор проходить потужний імпульс струму, що створює імпульсне магнітне поле. Існують два варіанти впливу на заготовку.

При індукційному формоутворенні заготовка 1 не підключається в коло розряду. Змінне магнітне поле індуктора наводить у струмопровідній заготовці вихровий струм. Взаємодія струмів індуктора і заготовки зумовлює відштовхувальну (або притягальну, залежно від конфігурації) імпульсну електромагнітну силу F , під дією якої відбувається пластична деформація. При електродинамічному формоутворенні заготовка підключається в коло розряду паралельно або послідовно з індуктором. Зустрічні струми - сила F відштовхувальна; паралельні струми - сила притягальна. Перевагами МІУ перед традиційним пресуванням є: відсутність механічного контакту інструмент–заготовка (деформація виникає безконтактно), можливість обробки заготовок у закритих ємностях, висока точність і відтворюваність.

Технологічні застосування МІУ включають: листове штампування, калібрування, рельєфне формування, витягання, гофрування, формування ребер жорсткості. Особливо перспективне застосування в ремонтному виробництві АПК при відновленні пошкоджених елементів кабін і кузовів тракторів і

комбайнів. Принципова відмінність МІУ від ЕГЕ: у МІУ робочим тілом є магнітне поле (потрібен струмопровідний матеріал заготовки), а в ЕГЕ - ударна хвиля в рідині (можна обробляти будь-які матеріали, включаючи діелектрики).

6. Електричні огорожі для загінного випасання тварин

Електрична огорожа (електропастух) - практична і дуже поширена електроімпульсна установка в тваринництві. Вона дозволяє організувати загінне випасання ВРХ, свиней, овець і кіз без стаціонарного паркану, легко переносити і змінювати конфігурацію ділянки, ефективно захищати посіви і культури від потрав.

Конструкція: генератор імпульсів + м'який сталевий оцинкований дріт діаметром 1,5–2 мм, натягнутий на ізоляторах, закріплених на легких переносних опорах. Кількість проводів 1–3; висота підвісу 0,3–0,9 м (залежно від виду тварин); відстань між опорами 10–20 м; довжина лінії для установки ЕІ-200 - до 800 м, огорожувана площа - до 4 га. При доторканні тварини до дроту замикається коло через її тіло і ґрунт, і тварина отримує короткий безпечний, але неприємний удар - безумовний рефлекс виробляється за 2–3 дні. Параметри встановлені з умов безпеки і ефективності: частота імпульсів 1–2 Гц; амплітудне значення струму не більше 150 мА; кількість електрики в імпульсі не більше 2,5 мКл; тривалість імпульсу не більше 5 мс; амплітудне значення напруги на огорожі 2–10 кВ. Особливо важливо, що параметри струму і кількість електрики в імпульсі нормуються: при перевищенні нормативних значень можливе смертельне ураження тварини.

Генератор імпульсів - незалежний генератор релаксаційного типу (ГІЕ-1, ЕІ-200, ЕІС-1-30 тощо). Живлення: від батарей (4 × 45 В послідовно) або від мережі 220 В через знижувальний трансформатор. У схемі ГІЕ-1: стабілізатор напруги → перетворювач постійного струму → конденсаторний накопичувач → тиратрон-перемикач → підвищувальний трансформатор → огорожа. Можливі два режими: автоколивальний (безперервна подача імпульсів) і очікувальний (імпульс подається лише при доторканні тварини - ефективніший з точки зору

витрати заряду батарей). В очікувальному режимі датчик реєструє появу струму витоку через резистор R1, пороговий пристрій посилює сигнал і запускає перетворювач. При технічному обслуговуванні необхідно контролювати чистоту і справність ізоляторів, надійність підключення генератора і заземлення, відсутність контакту рослинності з дротом. У 2024–2026 рр. для великих пасовищ використовуються більш сучасні генератори з акумуляторним живленням і сонячними панелями, що забезпечують автономну роботу без підключення до мережі.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть три групи імпульсних електротехнологій і поясніть їх загальну відмінну ознаку. Завдяки чому миттєва потужність в момент імпульсу може бути в тисячі разів вищою за потужність джерела живлення?

2. Поясніть різницю між магнітострикційним і п'єзоелектричним перетворювачами. Чому в магнітострикційному використовується підмагнічування постійним струмом? Чому п'єзоперетворювачі виготовляють багат шаровими?

3. Що таке концентратор в ультразвуковому перетворювачі? Яку функцію він виконує і які форми концентраторів застосовують? Чому його застосування є обов'язковим у магнітострикційних установках?

4. Поясніть фізичний механізм кавітаційного очищення. Чому ультразвукове очищення деталей дає значно кращий результат, ніж ручне або вібраційне? Які частоти і інтенсивності оптимальні для кавітації?

5. Назвіть три практичних застосування ультразвуку в тваринництві і ветеринарії. Яким принципом засновано визначення товщини шпику у свиней? Чому для відлякування гризунів ультразвук модулюється за частотою?

6. Опишіть три стадії іскрового пробою в рідині при ЕГЕ. Чому ударна хвиля поширюється саме як зона стиснення? Запишіть формулу для максимальної сили струму.

7. Назвіть чотири практичних застосування ЕГЕ в АПК. Чому обробка молока і стічних вод ЕГЕ знищує мікроорганізми? Чим цей метод відрізняється від теплової стерилізації?

8. Поясніть принцип індукційного і електродинамічного формоутворення в МІУ. У чому відмінність між ними? Яка принципова відмінність МІУ від електрогідравлічних установок?

9. Назвіть нормативні параметри струму і напруги для електричної огорожі. Чому нормується не лише амплітуда струму, але і кількість електрики в імпульсі? Що станеться при перевищенні нормативних значень?

10. Опишіть два режими роботи генератора імпульсів ГІЕ-1 для електроогорожі. У чому перевага очікувального режиму перед автоколивальним? Яка сучасна тенденція у живленні генераторів для великих пасовищ (2024–2026 рр.)?

Лекція 2.6

Тема: «Ультразвукова техніка і технологія»

ПЛАН

1. Фізична природа, параметри та ефекти ультразвуку
2. Генерування ультразвуку: генератори, перетворювачі, концентратори
3. Ультразвукове очищення, пайка і зварювання: принцип, режими, обладнання
4. Диспергування, гомогенізація, відновлення деталей із застосуванням УЗ
5. Біологічна дія ультразвуку: пастеризація, передпосівна обробка, ветеринарія
6. Ультразвук для отримання інформації: дефектоскопія, вологоміри, ветеринарна діагностика

1. Фізична природа, параметри та ефекти ультразвуку

Ультразвук (УЗ) - це пружні механічні коливання і хвилі, що чергуються в часі процеси стиснення і розрідження і поширюються в твердому, рідкому та

газоподібному середовищах. Від чутного звуку ультразвук відрізняється виключно частотою: чутний звук займає діапазон 16 Гц - 15–20 кГц, а ультразвук - від 15–20 кГц до 10^9 Гц. Умовно розрізняють УЗ низької (до 100 кГц) і високої (понад 100 кГц) частоти; слабкої (до 10 Вт/м²) і потужної (до 10^6 – 10^7 Вт/м²) інтенсивності.

Основні параметри УЗ: амплітуда зміщення частинок A (м); частота f (Гц); звуковий тиск - змінна складова тиску в середовищі, амплітуда якої $p = \rho c f A$; хвильовий опір середовища ρc (добуток щільності на швидкість звуку) - ключова акустична характеристика; інтенсивність $I = p^2 / (2\rho c) = 2\rho c \pi^2 f^2 A^2$ (Вт/м²). Довжина хвилі $\lambda = C/f$, де C - швидкість звуку в середовищі: у металах $C = \sqrt{E/\rho}$, у рідинах і газах $C = 1/\sqrt{\beta\rho}$. Інтенсивність загасає по закону $I \sim e^{(-2\alpha x)}$, де α - коефіцієнт поглинання (м⁻¹); він зростає зі зростанням частоти, тому в'язкі середовища і газ сильніше поглинають УЗ, ніж тверді тіла і рідини. При переході хвилі між середовищами з різним хвильовим опором частина енергії відбивається - коефіцієнт відбиття $k_0 = (\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1)^2 / (\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)^2$. При переході з металу в повітря $k_0 \approx 1$ (УЗ практично не проходить), тому УЗ-обробку завжди ведуть через проміжну рідину.

Ефекти УЗ поділяють на первинні (механічної природи) і вторинні. Найважливіший первинний ефект - кавітація: у рідині у фазі розрідження утворюються мікропорожнини, які зникають у фазі стиснення, генеруючи миттєві піки тиску десятки МПа. Вторинні механічні ефекти - коагуляція зважених частинок, дегазація рідин, диспергування і розпорошення. Тепловий ефект - локальний нагрів у зонах поглинання. Хімічні ефекти - прискорення або ініціювання хімічних реакцій. Біологічні ефекти при малій інтенсивності - мікромасаж тканин, поліпшення обміну речовин, стимуляція; при великій - руйнування тканин через нагрівання і кавітацію.

2. Генерування ультразвуку: генератори, перетворювачі, концентратори

Генерування ультразвуку відбувається за дворівневою схемою: генератор ультразвукової частоти (УЗГ) → електроакустичний перетворювач → (за потреби) концентратор → технологічне середовище. УЗГ перетворює промислову частоту 50 Гц в електричну енергію ультразвукової частоти. Машинні генератори (до 100 кГц) практично вийшли з вжитку; лампові застосовувались до 1990-х рр.; сучасні - напівпровідникові транзисторні (надійні, економічні, основний тип) і тиристорні (потужні). Принципові електричні схеми УЗГ аналогічні схемам ВЧ-генераторів для діелектричного нагріву.

Магніострикційний перетворювач ПМС/ПМ використовує прямий магніострикційний ефект - зміну довжини феромагнітного сердечника (нікель, пермендюр - 49 % Fe + 49 % Co + 2 % V; альфер - 87 % Fe + 13 % Al) при намагнічуванні. Двостержневий сердечник (пакет з пластин) охоплений обмоткою, якою тече змінний струм ультразвукової частоти. Змінне поле викликає циклічні зміни довжини стрижнів - їх коливальні торці збуджують УЗ-хвилі. Магніострикційний ефект є парним: знак деформації не залежить від напрямку поля, тому частота коливань дорівнює подвоєній частоті струму. Для уникнення цього ефекту або для лінеаризації сердечник підмагнічують постійним струмом. Магніострикційні перетворювачі ефективні до 100–200 кГц; їх переваги - висока механічна міцність, великі акустичні потужності (інтенсивність до 200 кВт/м²), стійкість до корозії. Параметри серійних ПМС/ПМ: частоти 18, 22, 44 кГц; потужність 0,4–4 кВт; напруга 220 і 440 В.

П'єзоелектричний перетворювач використовує обернений п'єзоефект - деформацію кристалів (кварц, цирконат-титанат свинцю ЦТС-19, кераміка ВаТіО₃) під дією електричного поля. Пластина з п'єзоматеріалу між електродами змінює товщину в ритм з прикладеною напругою. П'єзоперетворювачі працюють до сотень МГц (ефект безінерційний, без втрат на гістерезис), однак через низьку механічну міцність пластин розвивають потужності лише до сотень ват (інтенсивність до 100 кВт/м²). Тому їх застосовують переважно в інформаційно-

вимірювальній техніці, а в потужних технологічних установках - магніострикційні.

Концентратор (акустичний трансформатор) - стрижень змінного перерізу, що з'єднує перетворювач ширшим торцем з технологічним середовищем. Завдяки звуженню перерізу амплітуда коливань зростає за рахунок збереження потужності - концентратор підсилює амплітуду в 10–15 разів, доводячи до 50 мкм. Форми: конічний, ступеневий, експоненційний. Також виконує функцію узгодження механічного опору навантаження з імпедансом перетворювача.

3. Ультразвукове очищення, пайка і зварювання: принцип, режими, обладнання

Ультразвукове очищення - найбільш широко впроваджений процес УЗ-технологій, особливо актуальний для ремонтного виробництва АПК. Механізм засновано на кавітації: у миючому розчині кавітаційні бульбашки проникають під плівку забруднення і відривають її від поверхні деталі. Одночасно акустичні мікропотоки транспортують забруднення від поверхні. Параметри: частота 18–44 кГц (на яких кавітація настає при помірній інтенсивності); інтенсивність 2,5–100 кВт/м²; температура розчину 60–80 °С; час очищення від десятків секунд до десятків хвилин залежно від виду забруднення. Миючий розчин: слабкий водний розчин тринатрійфосфату, силікату натрію або сульфанолю - замість токсичних органічних розчинників.

Порівняльна ефективність: при прополіскуванні залишається до 88 % забруднень, при вібраційному очищенні - близько 55 %, при ручному - близько 20 %, при УЗ - не більше 0,5 %. Особливо ефективно очищення деталей зі складною формою: вузькими щілинами, прихованими отворами, різьбовими поверхнями, де механічне очищення неможливе. Застосовують перед ремонтом, складанням, хромуванням, нікелюванням, фарбуванням. Можна очищати доїльну апаратуру і молочний посуд без застосування агресивних миючих засобів. Серійні установки: транзисторні УЗУ-0,25 (0,25 кВт, 18 кГц), УЗГ-10-1,6 (1,6 кВт); тиристорні УЗГ-2-4 (4 кВт), УЗГ-1-10/22 (10 кВт, 22 кГц).

Ультразвукова пайка відрізняється від традиційної тим, що жало паяльника через концентратор пов'язане з перетворювачем і здійснює коливання з частотою 18–44 кГц і амплітудою 3–20 мкм. Кавітація в розплавленому припої руйнує оксидну плівку на поверхні металу - чистий метал лудиться безпосередньо без флюсу. Це принципово важливо для алюмінію і його сплавів, оксидна плівка яких при звичайній пайці не руйнується флюсами. Прилади УП-21, УЗУП-2, УЗП-2-0,025 мають потужність 0,01–0,6 кВт. Ультразвукове зварювання металів виконується при зближенні деталей нормальною статичною силою з одночасною подачею УЗ-коливань по дотичній до поверхні. Коливання руйнують оксидні плівки і викликають локальну пластичність, після чого деталі з'єднуються без помітного нагрівання і зміни структури. Це дозволяє зварювати листи товщиною частки міліметра і виконувати мікрозварювання в електроніці. Машини МТУ, кліщі КТУ (точкове зварювання), машини МШУ (шовне зварювання), потужність 0,1–4 кВт.

4. Диспергування, гомогенізація, відновлення деталей із застосуванням УЗ

Ультразвукове диспергування використовує кавітацію і акустичні мікропотоки для подрібнення твердих тіл у рідині (суспензії), розпорошення рідин у повітрі (аерозолі) і отримання емульсій (дрібні краплі однієї рідини в іншій взаємно нерозчинній). Для АПК особливо корисне ультразвукове емульгування: змішувач-емульгатор УГС-10 застосовують, зокрема, для змішування риб'ячого жиру з водою при виготовленні кормових добавок для тварин і птиці - традиційними методами стала емульсія неможлива через несумісність фаз. Ультразвукова гомогенізація молока - подрібнення жирових кульок - підвищує його зберігання і засвоюваність, забезпечуючи стабільну однорідну дисперсію жиру. Це альтернатива механічній гомогенізації; важливою перевагою є можливість поєднання з пастеризацією в одному потоці.

УЗ також ефективно застосовують для боротьби з накипоутворенням у теплообмінниках і котлах: при введенні коливань в теплоагент солі не

кристалізуються на стінках, а залишаються у вигляді зважених частинок, які легко виводяться з системи. Для сушіння матеріалів УЗ інтенсифікує тепломасообмін: акустичні мікропотоки прискорюють видалення вологи з поверхні і капілярного переміщення рідини - ця властивість перспективна для зерносушіння і сушіння кормових трав.

Відновлення зношених деталей методом наплавлення суттєво покращується при введенні УЗ-коливань у розплавлений метал. Дослідження ЧИМЕСХ (Ульман, Авдєєв) показали: ультразвук викликає дегазацію розплавленого металу, знижуючи пористість наплавленого шару в 3–5 разів - найхарактерніший дефект вібродугового наплавлення. Крім того, зменшується технологічне викривлення довгомірних деталей (колінчасті вали) під час наплавлення. Після наплавлення ультразвукова ударна обробка поверхні інструментом, що вагається з УЗ-частотою, забезпечує поверхневе зміцнення через пластичну деформацію - без нагрівання деталі. Розмірна УЗ-обробка твердих крихких матеріалів (скло, кераміка, алмаз, германій, кремній) дозволяє виготовляти складні фасонні деталі, отвори і канавки в матеріалах, де традиційні методи різання неможливі або надто дорогі.

5. Біологічна дія ультразвуку: пастеризація, передпосівна обробка, ветеринарія

Біологічна дія ультразвуку залежить від його інтенсивності і частоти. При малих інтенсивностях УЗ-коливання здійснюють мікромасаж тканин, поліпшують обмін речовин і стимулюють функціонування живих організмів. При великих інтенсивностях тканини руйнуються - через нагрівання і кавітацію. Ця подвійність надає ультразвуку унікальні можливості в агробіологічних застосуваннях.

УЗ-пастеризація молока і стерилізація рідких харчових продуктів є важливою альтернативою тепловій обробці. При ультразвуковій обробці з інтенсивністю в діапазоні 10–100 кВт/м² мікроорганізми руйнуються переважно внаслідок кавітаційного механічного ефекту, а не нагрівання. Це дозволяє

зберегти термолабільні вітаміни, ферменти і смакові якості молока, яке неминуче втрачаються при тепловій пастеризації. Особливо перспективним є поєднання помірною нагрівання (термосонікація) і УЗ - ефект пастеризації досягається при значно нижчій температурі.

Передпосівна УЗ-обробка насіння прискорює їх проростання і підвищує врожайність через декілька механізмів: активізацію метаболічних процесів у зародку, покращення водопоглинання і проникності насінневої оболонки, знезараження поверхні. Дія цілеспрямована - режими підбираються індивідуально для кожної культури. Лікування тварин із застосуванням ультразвукових апаратів УРСКАМ-7Н, УТС-1, ВУТ-1 при інтенсивності 1–12 кВт/м² і частоті від сотень кГц до кількох МГц є ефективним при маститах, ранових інфекціях, фурункульозі, захворюваннях очей, суглобів і кісток. Ультразвукові коливання забезпечують глибокий мікромасаж, прискорюють розсмоктування запальних інфільтратів і загоєння. У 2024–2026 рр. портативні УЗ-апарати для ветеринарії стали компактнішими і доступнішими, що дозволяє їх використання безпосередньо в умовах ферм без виїзду у ветклініку.

6. Ультразвук для отримання інформації: дефектоскопія, вологоміри, ветеринарна діагностика

Застосування ультразвуку для отримання інформації засноване на аналізі УЗ-сигналу, що пройшов через досліджуваний об'єкт або відбитого від нього. Як приймач майже завжди застосовують п'єзоелектричні перетворювачі - завдяки їх чутливості і здатності працювати на високих частотах (до десятків МГц). Методи поділяють на дві групи.

Методи, засновані на вимірюванні загасання і швидкості поширення УЗ в середовищі, використовують залежність коефіцієнта поглинання α і швидкості звуку C від складу і властивостей речовини. На цьому принципі будуються ультразвукові вологоміри для зерна, сіна, кормів і ґрунту - вимірюють загасання УЗ при заданій частоті, яке зростає зі збільшенням вологості. Прилади для визначення вмісту білка і жиру в молоці - вимірюють швидкість і загасання на

кількох частотах і обчислюють склад математично. Прилади для контролю концентрації миючих розчинів у ремонтному виробництві.

Методи, засновані на відбитті УЗ-хвиль від меж розділу середовищ, є основою УЗ-дефектоскопії, гідролокації та ветеринарної діагностики. При дефектоскопії УЗ-зонд прикладають до поверхні деталі через шар контактної мастила (гель), що виключає повітряний зазор з $k_0 \approx 1$. Хвиля поширюється в деталі; при наявності тріщини, раковини або розшарування частина енергії відбивається від дефекту і повертається до приймача раніше, ніж відбита від протилежної поверхні. За часом приходу відбитого сигналу обчислюють глибину і розмір дефекту. Сучасні цифрові дефектоскопи (типу А1214) виводять результат на екран у вигляді В- або С-сканів. УЗ-дефектоскопія зварних швів, болтових з'єднань і деталей ходової частини тракторів і комбайнів є стандартним методом неруйнівного контролю при технічному обслуговуванні.

У ветеринарній діагностиці прилад «Су-пор-БМ» (частота 2 МГц) призначений для раннього визначення поросності свиней: УЗ-хвилі через шар контактної мастила проникають у тіло тварини і відбиваються від рідини в матці супоросної свині, яка поглинає і відбиває хвилі інакше, ніж порожня матка. Раннє (з 3–4-го тижня) визначення поросності дозволяє вчасно коригувати годівлю і освітлення, суттєво скорочуючи витрати корму і праці на утримання неплідних тварин. Аналогічні прилади застосовують для прижиттєвого вимірювання товщини жирового шару і м'язів у свиней - «прижиттєва м'ясна оцінка» є стандартним інструментом сучасної племінної роботи. У 2024–2026 рр. ультразвукові ветеринарні сканери з кольоровим відображенням (В-режим) стали стандартним обладнанням великих тваринницьких господарств: вони дозволяють визначати стан ембріона, оцінювати вим'я, діагностувати захворювання внутрішніх органів.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте визначення ультразвуку. Чим він відрізняється від чутного звуку? Запишіть формули для звукового тиску і інтенсивності ультразвуку. Що таке хвильовий опір середовища?

2. Поясніть явище кавітації в рідині. Чому кавітація є основним робочим механізмом при УЗ-очищенні? Які значення тиску виникають при схлопуванні кавітаційних бульбашок?

3. Порівняйте магнітострикційний і п'єзоелектричний перетворювачі за: фізичним принципом, матеріалами, діапазоном частот, потужністю, галузями застосування.

4. Для чого призначений концентратор? Поясніть фізичну причину підсилення амплітуди коливань. Наведіть типові значення підсилення і максимальної амплітуди.

5. Наведіть порівняльні дані залишкових забруднень на поверхні деталей після різних методів очищення. Чому УЗ-очищення особливо ефективно для деталей зі складною формою?

6. Поясніть механізм ультразвукової пайки алюмінію без флюсу. Чому цей метод важливий для ремонту алюмінієвих деталей техніки? Чим відрізняється УЗ-зварювання від традиційного?

7. Яким чином УЗ-коливання поліпшують якість наплавлення при відновленні зношених деталей? У скільки разів знижується пористість? Що таке УЗ-зміцнення поверхні?

8. Поясніть переваги ультразвукової пастеризації молока перед тепловою. При якому механізмі гинуть мікроорганізми? Що таке термосонікація?

9. Опишіть принцип УЗ-дефектоскопії. Чому зонд прикладають через шар контактного гелю? Що визначають за часом повернення відбитого сигналу?

10. Як працює прилад «Су-пор-БМ» для визначення поросності свиней? Яку економічну вигоду дає раннє визначення поросності? Що таке «прижиттєва м'ясна оцінка» і які прилади для неї використовують?

Лекція 2.7

Тема: «Магнітна обробка матеріалів»

ПЛАН

1. Фізичні основи магнітного поля. Джерела: постійні магніти та електромагніти
2. Силова дія магнітного поля. Принцип магнітної сепарації
3. Магнітне очищення насіння від бур'янів. Машина ЕМС-1А і аналоги
4. Магнітне очищення кормів і видалення металевих предметів зі шлунку тварин
5. Магнітна обробка води: принцип, режими, застосування в АПК
6. Інші застосування магнітного поля в сільськогосподарському виробництві

1. Фізичні основи магнітного поля. Джерела: постійні магніти та електромагніти

Магнітна обробка матеріалів - один із напрямів електрофізичних технологій, де діючим фактором є постійне або змінне магнітне поле без безпосереднього контакту з оброблюваним об'єктом. В АПК магнітне поле знаходить широке практичне застосування у очищенні насіння, кормів і води, у ветеринарії та в покращенні агрохімічних властивостей матеріалів.

У технологічних процесах АПК зазвичай застосовують магнітні поля з індукцією до 4 Тл. Джерелами служать постійні магніти і електромагніти. Постійні магніти виготовляють шляхом намагнічування магнітно-твердих матеріалів - феритобарієвих сплавів, сплавів Магніко (Fe-Ni-Al-Co-Cu), Алні (Fe-Ni-Al-Cu) та рідкоземельних сплавів. Їх переваги: простота конструкції, відсутність джерела живлення, надійність (поле не може зникнути раптово через відключення електроенергії), пожежна безпека. Суттєві недоліки: труднощі регулювання індукції і поступове розмагнічування з часом, що вимагає їх periodical перемагнічування. Різновидом є магнітофони - гнучкі вироби з суміші в'язучих речовин (цемент, каучук, смола) і феромагнітного порошку, на поверхні яких після намагнічування «записується» поле заданої конфігурації. Електромагніти позбавлені недоліків постійних магнітів: індукція легко і точно регулюється струмом обмотки, поле може бути миттєво ввімкнене або вимкнене, а також реверсовано. Їх недолік - необхідність джерела живлення і ускладненість

конструкції. У більшості технологічних установок АПК для сепарації і транспортування використовують електромагніти постійного струму від мережі 220 В через випрямляч.

У 2024–2026 рр. у сільськогосподарській техніці набули поширення постійні магніти на основі рідкоземельних сплавів NdFeB (неодим–залізо–бор) - при значно меншому об'ємі вони забезпечують поле в 5–10 разів сильніше за феритові. Це дозволяє виготовляти компактні і легкі магнітні сепаратори і захисні магнітні пристрої для кормоцехів без зниження ефективності.

2. Силова дія магнітного поля. Принцип магнітної сепарації

Фізична основа всіх методів магнітної сепарації - різниця сил, що діють у неоднорідному магнітному полі на речовини з різною магнітною сприйнятливістю χ . Сила, що діє на частинку в неоднорідному полі: $F_m = \chi \cdot V \cdot \mu_0 \cdot H \cdot (dH/dx)$, де χ - магнітна сприйнятливість частинки; V - об'єм частинки; H - напруженість поля; dH/dx - градієнт напруженості вздовж осі переміщення. Ефективна магнітна сприйнятливість частинки $\chi = (\chi_0)/(1 + N \cdot \chi_0)$, де N - коефіцієнт розмагнічування (залежить від форми - для кулі $N = 1/3$). Для феромагнетиків χ_0 може бути в десятки і сотні тисяч разів більшою, ніж для парамагнітних матеріалів і тим більше для діамагнетиків. Ця колосальна різниця є фізичним підґрунтям магнітної сепарації: феромагнітні частинки (залізо, нікель, кобальт та їх сплави) у неоднорідному полі притягуються до зони максимальної напруженості з силою, що на порядки перевищує силу, що діє на немагнітні частинки. Для виконання умови утримання насіння бур'яну на поверхні магнітного барабана необхідно, щоб $F_m > F_c + F_g \cdot \sin \beta$, де F_c - відцентрова сила, F_g - сила тяжіння, β - кут між відцентровою силою і вертикальною віссю.

Принципово важливе обмеження методу: він ефективний лише при наявності чіткої різниці магнітних або геометричних властивостей між розділюваними компонентами. У разі магнітного очищення насіння від бур'янів, де обидва компоненти є немагнітними, ця різниця вноситься штучно - шляхом

попередньої обробки суміші магнітним порошком, що прилипає лише до шорсткої поверхні насіння бур'янів.

3. Магнітне очищення насіння від бур'янів. Машина ЕМС-1А і аналоги

Магнітний метод очищення насіння заснований не на магнітних властивостях самого насіння, а на різниці морфологічної структури поверхні насіння культурних рослин і бур'янів. Цей метод ефективний для дрібнонасінних культур - конюшини, люцерни, льону, тимофіївки, - де бур'яни (повитиця, плевел, подорожник, смілка, волошка, гірчак рожевий та ін.) мають шорстку, щетинясту або бугристу поверхню, а насіння культур - гладку. Насіння перед очищенням змішують з феромагнітним (залізним або магнетитовим) порошком. Порошок міцно прилипає до шорсткої поверхні насіння бур'янів і практично не затримується на гладкій поверхні насіння культур. Оброблена суміш надходить на поверхню обертового барабана з латуні (немагнітний матеріал). Всередині барабана нерухомо розміщений електромагніт, полюси якого займають приблизно половину внутрішньої окружності. У зоні дії магнітного поля насіння бур'янів з прилиплим порошком утримуються на поверхні барабана і скидаються вниз в окремий бункер. Насіння культурних рослин без порошку скочують з барабана раніше - до нижньої зони - і потрапляють в інший бункер.

Машина ЕМС-1А (електромагнітний сепаратор) має продуктивність на очищенні насіння конюшини 180–250 кг/год, встановлена потужність - 3,1 кВт (в тому числі електропривод 2,2 кВт, випрямляч для живлення електромагніту 0,9 кВт); частота обертання барабана 42–43 об/хв; витрата магнітного порошку 1–2,5 % від маси насіння. Удосконалена машина СМЦ-0,4 (потужність 2,6 кВт) забезпечує продуктивність 400 кг/год на насінні конюшини і 500 кг/год на льоні - суттєво вища ефективність при меншій потужності порівняно з ЕМС-1А. Переваги магнітного методу порівняно з іншими способами розділення: очищення здійснюється за біологічною якістю поверхні насіння, а не лише за

розміром і масою, що дозволяє відбрати найкращий матеріал; метод не пошкоджує насіння; процес легко автоматизувати.

4. Магнітне очищення кормів і видалення металевих предметів зі шлунку тварин

Забруднення концентрованих і грубих кормів металевими предметами - шматочками дроту, цвяхами, гайками, болтами, уламками металевого інвентарю - є серйозною проблемою для тваринницьких господарств. Наслідки двоякі: по-перше, металеві включення руйнують ножі і сита кормоподрібнювачів, гранулятори і мішалки кормоцеху; по-друге, металеві предмети, проковтнуті коровами разом з кормом, можуть перфорувати стінки рубця і сітки, спричиняючи травматичний ретикулоперикардит - захворювання, що призводить до значних продуктивних втрат і нерідко до загибелі тварини.

Метод очищення: корми тонким шаром переміщують стрічковим конвеєром під полюсами підвісних електромагнітів або стаціонарних постійних магнітів. Металеві ферромагнітні предмети притягуються до магнітів і відокремлюються від кормової маси. Надалі (при виключеному постійному магніті або в паузі живлення електромагніта) вони скидаються у збірник. Для очищення зерна, продуктів його подрібнення і борошністої сировини на підприємствах комбікормової промисловості широко застосовують барабанні і пластинчасті магнітні сепаратори - стандартна операція в технологічному потоці. Для стебельчастих кормів (сіно, солома, сінаж) розроблений електромагнітний сепаратор грубих кормів з підвісним електромагнітом М-22В (потужність 2,2 кВт), підключеним через випрямний міст. При швидкості стрічки 1,5 м/с, куті нахилу магнітної системи 45° і зазорі між барабаном і полюсами 0,2 м він забезпечує 100 % витягнення металевих включень при продуктивності 40 т/год.

Видалення металевих предметів зі шлунку великої рогатої худоби здійснюється магнітним зондом. Через рот і стравохід корови вводять намагнічений стрижень (електромагніт у вигляді циліндра діаметром 30–35 мм, довжиною 70–90 мм) з гнучким провідником. Потрапляючи в рубець і сітку,

магніт притягує дрібні металеві предмети, після чого зонд разом з металом витягують. Для профілактики в ряді господарств застосовують постійні внутрішні магніти, які корова ковтає і носить у сітці протягом усього продуктивного життя, утримуючи всі металеві предмети, що потрапляють.

5. Магнітна обробка води: принцип, режими, застосування в АПК

Магнітна обробка води перед подачею в котли, водонагрівачі і системи технологічного водопостачання призначена для зменшення або повного попередження накипоутворення. Без обробки солі жорсткості (переважно карбонат кальцію CaCO_3) при нагріванні кристалізуються на гарячих поверхнях теплообмінника, утворюючи щільний шар накипу з теплопровідністю 0,5–2 Вт/(м·К) - у 10–30 разів нижчою, ніж у металу. Накип товщиною 1–2 мм підвищує витрату палива або електроенергії на нагрівання на 5–10 %, а при товщині 5 мм - на 25–30 %. Видалення накипу є трудомістким і потребує зупинки обладнання.

Фізична суть магнітної обробки: при пропусканні через неоднорідне магнітне поле зі змінною полярністю у воді утворюються активні центри кристалізації в об'ємі рідини. При наступному нагріванні солі кристалізуються на цих центрах, формуючи пухкий шлам, що легко видаляється потоком, а не щільний накип на стінках. Додаткова гіпотеза: феромагнітні домішки (оксиди і гідрати заліза), що присутні у більшості природних вод, в магнітному полі злипаються і утворюють зародки кристалізації. Умова ефективності: концентрація вільного CO_2 у воді повинна бути нижчою за рівноважну - тоді вода перенасичена щодо CaCO_3 . Це означає, що ефект яскравіше виражений влітку, коли рослини споживають CO_2 з ґрунтових вод, і слабший взимку.

Параметри ефективного режиму обробки: загальна жорсткість не більше 12–14 мг·екв/л; вміст солей не більше 1100 мг/л; швидкість води 0,4–1 м/с; напруженість магнітного поля 120–150 кА/м; зазор між магнітом і корпусом не більше 10 мм (при збільшенні зазору опір магнітного шляху різко зростає). Важлива умова: воду потрібно подавати у котел або теплообмінник не пізніше

ніж через 1–4 години після обробки, оскільки набуті властивості поступово зникають. Серійний апарат ПМУ-1 на постійних магнітах: зазор 2,5 мм; напруженість 88–143 кА/м; швидкість 1–2 м/с; продуктивність 2–7 м³/год. Апарати з котушками електромагнітів і трансформаторним маслом (для охолодження котушки) забезпечують регульовану напруженість і кращу стабільність поля. Критична оцінка: загальноновизнаної теорії механізму дії магнітної обробки на воду до сьогодні не існує - частина вчених ставить під сумнів саму можливість зміни фізико-хімічних властивостей води в магнітному полі. Практичний результат нестабільний і залежить від складу конкретної води, тому застосування слід перевіряти дослідним шляхом.

6. Інші застосування магнітного поля в сільськогосподарському виробництві

Зрошення посівів магнітноактивованою водою є перспективним напрямом, хоча результати досліджень варіюються. Експерименти показали підвищення врожайності різних культур на 6–40 % при поливанні водою, обробленою в магнітному полі. Зокрема, врожайність цукрового буряку і рису зростала на 7–16 % при передпосівному замочуванні насіння. При розсоленні ґрунтів в умовах зрошуваного землеробства магнітно оброблена вода дозволяє скоротити витрату промивної води на 30–50 %, а вимивання токсичних солей збільшується в 1,2–2 рази. Механізм цих ефектів також теоретично не обґрунтований. Можливі пояснення: зміна структури гідратних оболонок іонів, утворення дрібніших крапель при розпиленні (при зрошенні), активація розчинності мінеральних елементів.

Магнітна сепарація в зерновому виробництві застосовується не лише для відокремлення насіння бур'янів від культурних рослин, але і для виведення сажкових мішечків пшениці (що мають шорстку поверхню), відокремлення лушпиння від ядра соняшнику і навіть для виведення травмованих, мороженобійних і пророслого насіння. В останньому випадку ці насінини за рахунок зміни хімічного складу поверхні після пошкодження набувають трохи

підвищену адгезію до феромагнітного порошку порівняно з повноцінним насінням - хоча ефективність цього методу значно нижча, ніж при розділенні за шорсткістю.

Магнітна очистка транспортного обладнання від феромагнітних частинок зносу є профілактичним заходом у кормовиробництві. В 2024–2026 рр. особливої актуальності набуло застосування постійних магнітів NdFeB з високою коерцитивною силою в стаціонарних самоочисних сепараторах для захисту дорогого обладнання зернопереробних і комбикормових заводів. Такі сепаратори не потребують обслуговування місяцями і забезпечують надійне видалення металевих частинок розміром від 0,5 мм і більше. Ще одне застосування електромагнетизму в ветеринарії - магнітотерапія тварин: вплив слабого постійного або змінного магнітного поля на хворі ділянки тіла з терапевтичною метою (прискорення загоєння ран, зменшення набряків). Хоча наукова доказова база залишається обмеженою, практичне застосування магнітотерапевтичних апаратів у великих тваринницьких господарствах України зростає.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Порівняйте постійні магніти і електромагніти як джерела поля для технологічних установок АПК. У чому перевага сплавів NdFeB порівняно з феритовими магнітами і чому вони стали стандартом у 2024–2026 рр.?

2. Запишіть формулу для сили, що діє на феромагнітну частинку у неоднорідному магнітному полі. Що таке магнітна сприйнятливості і чому її значення для феромагнетиків є основою магнітної сепарації?

3. Поясніть принцип магнітного очищення насіння конюшини від повитиці. Чому метод заснований на морфологічній різниці поверхні, а не на магнітних властивостях самого насіння? Яка умова утримання насіння бур'яну на барабані?

4. Опишіть конструкцію і параметри машини ЕМС-1А. Що вдосконалено в машині СМЦ-0,4? Яка витрата магнітного порошку і як його відновлюють?

5. Назвіть два шляхи шкоди від металевих включень у кормах. Опишіть принцип роботи підвісного електромагніта для очищення стебельчастих кормів. Які параметри забезпечують 100 % видалення металу?

6. Що таке внутрішній магнітний зонд для ВРХ і яке його профілактичне застосування? Чим відрізняється профілактика від лікувальної процедури видалення металу?

7. Поясніть механізм зменшення накипоутворення при магнітній обробці води. Що відбувається з солями жорсткості у воді після обробки та при нагріванні? Чому вода повинна потрапити в котел не пізніше ніж через 1–4 год?

8. Які умови забезпечують ефективність магнітної обробки води? Що відбувається при перевищенні зазору між магнітом і корпусом понад 10 мм? Від чого залежить сезонна нестабільність ефекту?

9. Які результати отримані при зрошенні посівів магнітноактивованою водою? Які культури найбільш чутливі? Чому ці дані слід трактувати з обережністю?

10. Чому у підручниках застережено, що теорія магнітної обробки водних систем ще не створена? Яке практичне значення цієї невизначеності для виробника, що планує впровадити магнітні апарати?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Stavinskiy, A., Vakhonina, L., Martynenko, V., Mardziavko, V., & Rudenko, A. (2024). The use of surface strengthening to increase the wear resistance of working bodies of agricultural machines. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 28(2), 21-32. <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/2.2024.21>.
2. Stavinskiy, A., Vakhonina, L., Martynenko, V., Mardziavko, V., & Rudenko, A. (2025). Influence of electromagnetic radiation on the growth and productivity of agricultural crops in the agro-industrial complex. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 21(1), 59-75. <https://doi.org/10.31548/dopovidi/1.2025.59>.
3. Rudenko, A., Mardziavko, V., Martynenko, V., & Kundenko, M. (2025). Research into the influence of the electromagnetic field on cell ion channels using modeling and measurement systems. *Radiotekhnika*, (222), 235–241. <https://doi.org/10.30837/rt.2025.3.222.24>.
4. Електротехнології в АПК : навч. посіб. / В. С. Шебанін, І. В. Бацуровська, В. І. Гавриш, В. А. Грубань ; за заг. ред. акад. В. С. Шебаніна. Миколаїв : МНАУ, 2022. 325 с.
5. Matvienko M. V., Martynenko V. O., Vakhonina L. V. Stress–Strain state of joints with a soft interlayer under mechanical loading. *International applied mechanics*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10778-023-01203-3>.
6. Calculation of optimal geometric parameters electrical apparatus for controlling the irrigation system / O. Sadovoy et al. *IEEE 5th international conference on modern electrical and energy system (MEES)*. 2023. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402456>.
7. Integration of CAD electrical machines and apparatuses with multiphysical modelling: an approach to matching electromagnetic and thermal models / L. Vakhonina et al. *Machinery & energetics*. 2026. Vol. 17, no. 1. P. 28–42. URL: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2026.28>.
8. Integration of control and measurement devices into CAD models of industrial power systems: metrological aspects of accuracy and impact on energy

efficiency / L. Vakhonina et al. *Itegam-jetia*. 2026. Vol. 12, no. 58. P. 1487–1497.
URL: <https://doi.org/10.5935/jetia.v12i58.3469>.

9. Матвійчук В. А., Рубаненко О., Стаднійчук І. Електротехнології в АПК : навчальний посібник. Вінниця : ТОВ «ТВОРИ», 2020. 272 с.

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

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

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

Навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В АПК

Укладачі: **Мартиненко Володимир Олександрович**

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 8,4.

Тираж 20 прим. Зам. № _____

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.