

Механізація, електрифікація

УДК 621.365
© 2012

І.П. Кондратенко,
доктор технічних наук

В.П. Лисенко,
кандидат
технічних наук

А.О. Березюк

Д.С. Комарчук

Національний
університет біоресурсів
і природокористування
України

ІНДУКЦІЙНА УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ ЗЕРНА РІПАКУ

*Розглянуто можливість застосування
циліндричного індуктора промислової частоти з
використанням пучка феромагнітних стрижнів як
теплообмінної поверхні для термообробки зерна
ріпаку.*

Технологічні процеси обробки сільськогосподарської продукції передбачають її нагрів за переробки та зберігання. Теплова обробка застосовується у підготовці посівного матеріалу, приготуванні різних кормових сумішей, сушінні сільськогосподарської продукції перед закладанням на зберігання і т.ін.

Широко застосовують теплову обробку у виробництві олії. Процес переробки переважно залежить від вологості та температури олійного матеріалу, що визначає ефективність механічного процесу видалення олії. Тому дуже важливо правильно вибрати такий технологічний режим теплової обробки, який би найкраще враховував хімічний склад і теплофізичні властивості олійного матеріалу, а також конструкцію теплообробної установки.

Якість термічної обробки та енергетична ефективність технологічного процесу теплової обробки визначаються, крім фізичних властивостей зерна, способом організації теплообміну в теплообмінних апаратах, серед яких вирізняють апарати із [2]: рухомим гравітаційно-щільним шаром без подачі повітря; рухомим шаром, що перемішується (обертів барабани із пучками стрижнів, ребрами, апарати з обертівими шнеками, лопатками); зернистим проміжним теплоносієм, що використовується для нагрівання дрібнодисперсних матеріалів; спадним рухом шару матеріалу уздовж віброуючого лотка, який являє собою поверхню нагріву.

Досить перспективними є апарати з рухомим шаром без подачі повітря, що контактує з на-

грітими трубами [3]. Ці апарати характеризуються великою надійністю, простотою конструкції, компактністю та високою тепловою ефективністю.

Ефективність таких апаратів визначається:

1) геометричними характеристиками поверхні нагріву (використання елементів невеликої довжини, вибір ефективних теплообмінних профілів; для пучків стрижнів — вибір оптимального компонування, раціональної орієнтації, вибір розмірів каналів, що забезпечують вільне пересування дисперсних середовищ);

2) розвиненням поверхонь (умови, за яких ребра дають змогу не лише підвищити теплообмін за рахунок збільшення контактувальної поверхні, а й забезпечити поліпшення тепловіддачі);

3) динамічним впливом на потік: а) збільшення швидкості руху часток, за якого настає розпушення та розрив шару; б) вібрація шару; в) раціональний вибір взаємного напрямку руху компонентів;

4) механічним впливом на поверхню нагрівання (вібрація або обертання);

5) способом передачі енергії від джерела до поверхні теплообміну.

Одним з ефективних методів передачі енергії є індукційний спосіб.

Мета роботи — обґрунтування параметрів теплообмінних апаратів з рухомим шаром без подачі повітря під час застосування індукційного способу нагріву теплопередавальних поверхонь.

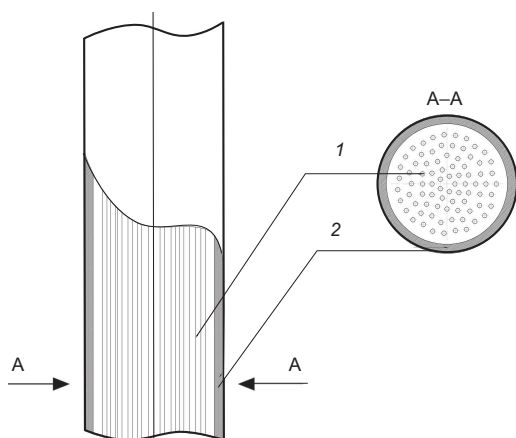


Рис. 1. Циліндричний індуктор із завантаженням у вигляді багатострижневої системи: 1 – феромагнітні стрижні; 2 – циліндричний індуктор

Результати досліджень. Індукційний метод нагріву заснований на виникненні вихрових струмів в електропровідному середовищі під дією змінного електромагнітного поля. При цьому за рахунок протікання вихрових струмів відбувається нагрів металевих елементів конструкції згідно із законом Джоуля.

Індукційний нагрів застосовується в різних технологічних процесах (від термообробки та сушіння матеріалів до машинобудування й металообробки) і має ряд переваг: високу щільність потоку електромагнітної енергії; можливість досягнення необхідних температур в тілі, що нагрівається (в досить широкому діапазоні); процес нагріву є екологічно безпечним; можливість керування розподілом температури завдяки конструктивним рішенням, зміни режимів роботи індукційного обладнання (частоти, напруги живлення); відносно високі енергетичні показники (коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності).

Для ефективного нагріву дисперсних матеріалів, до яких належить насіння ріпаку, важливим є розгалужена поверхня теплообміну, що може бути реалізована в циліндричному індукторі із завантаженням у вигляді пучка стрижнів чи труб. У цьому разі поверхня теплообміну одного стрижня великого діаметра у 3–5 разів буде меншою, ніж стрижнів меншого діаметра за збереження металоємності виробу. Розміщуючи стрижні на такій відстані один від одного, за якої забезпечується вільне пересування дисперсного матеріалу, можна забезпечити необхідні параметри нагріву (рис. 1).

Геометричні параметри індуктора обиралися відповідно до необхідної продуктивності пристрою попереднього нагріву. Для установки

видалення олії з насіння ріпаку, що функціонує у ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція», продуктивність становить 160 кг/год. Необхідний об'єм насіння можна нагріти в каналі з діаметром $d_{\text{кан}}=0,152$ м під час безперервної подачі матеріалу. За таких умов для досягнення необхідної ефективності теплової обробки насіння ріпаку розроблений індукційний нагрівач мав такі геометричні параметри: довжина індуктора $a=0,6$ м, внутрішній діаметр індуктора $d_{\text{інл}}=0,165$ м, кількість витків обмотки $w=180$. При таких діаметрах циліндричних індукторів може бути застосовано струм промислової частоти (50 Гц) [6, 8]. Живлення індукційного пристрою здійснювалося від джерела змінного струму з напругою 220 В.

Геометричні параметри завантаження обиралися з міркувань вільного просипання зерен ріпаку між стрижнями. Використавши рекомендації [1], було виявлено, що характерна відстань між стрижнями становить 0,009 м, потрібна кількість стрижнів для технологічного процесу термообробки зерен ріпаку при заданій продуктивності устаткування становить 80 шт., діаметр кожного стрижня — $d_{\text{ст}}=0,006$ м.

Електромагнітний розрахунок індукторів із завантаженням у вигляді пучка стрижнів може бути реалізований на основі методики, що наведена в роботах [4, 5]. Отже, вихідними даними для розрахунку індуктора є геометричні розміри та електрофізичні характеристики завантаження. Крім того, у завданні щодо розрахунку індуктора визначені напруга і частота живлення. Попередньо також визначено потужність нагрівальної установки — 5 кВт. При цьому насіння ріпаку має нагріватися до рекомендованої за технологією температури (115°C).

Для заданих характеристик індуктора за результатами розрахунку встановлено кількість витків w та струм в індукторі I . За величиною струму в індукторі, з урахуванням рекомендованої для електричних машин допустимої густини струмів, запропоновано тришарове виконання обмотки індуктора.

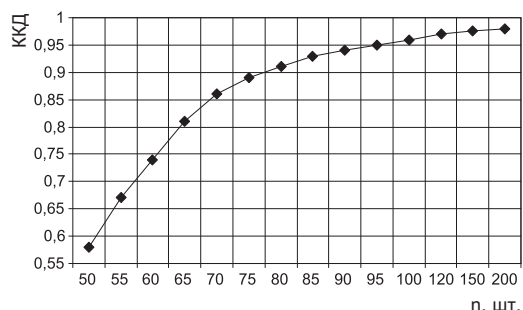


Рис. 2. Залежність зміни ККД індуктора від кількості стрижнів у завантаженні

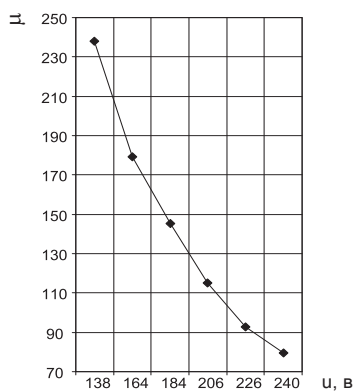


Рис. 3. Залежність зміни магнітної проникності від напруги

Розрахунок активного опору індукційного провідника здійснювався за рекомендаціями розрахунку додаткових втрат в багатшарових обмотках електричних машин і трансформаторів [7, 9]. Внаслідок цього встановлено, що при загальній кількості витків індуктора $w=180$ вони розподіляються в 3-х шарах по 60 витків у кожному шарі. Як провідник був вибраний провід ПДС 3,5×6 з ефективним перерізом 20 мм². Обмотка індуктора виконувалася з кроком 10 мм, довжина провідників при цьому становила 99 м. Між шарами обмотки вкладалися міжшарова ізоляція завтовшки 0,5 мм. Отже, габаритні розміри індуктора становили: внутрішній діаметр — 165 мм, зовнішній діаметр — 186 мм, довжина намотки індуктора — 0,6 м.

Після виготовлення індуктора був визначений його активний опір за допомогою вимірювального приладу RLC-метр серії BR2876. З'ясовано, що активний опір на частоті 50 Гц становить 0,102 Ом, і збігається з розрахунковими даними за методикою [9].

Встановлення енергетичних характеристик, їх точність та достовірність відповідно визначається достовірністю електрофізичних характеристик матеріалу, що нагрівається. У роботі було виконано експериментальне визначення питомої електропровідності сталевих стрижнів за методикою прямого вимірювання опору високочастотним мостом (імпедансометром). Питомий опір стрижнів (катанки) становив $9,15 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$. Така величина питомого опору не є характерною для виробів зі сталі, а є фактичною величиною, на якій ґрунтується визначення компонентів електромагнітного поля та енергетичних характеристик. Відтак слід було б визначити і магнітні характеристики феромагнітного матеріалу, зокрема основну криву намагнічування. Однак ця процедура виявилася дуже складною і трудомісткою, тому під час

розрахунків магнітні властивості феромагнітного завантаження прийнято такими, що відповідають стандартним характеристикам конструкційної сталі (Ст. 3), основна крива намагнічування цієї сталі добре апроксимується таким виразом:

$$\mu = 0,625 \cdot |H|^{-0,894}$$

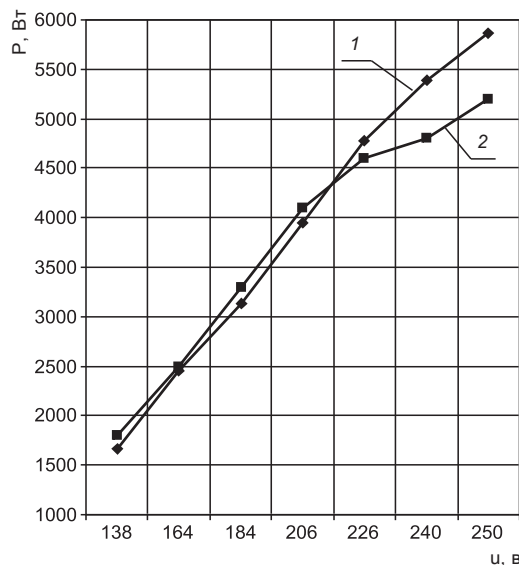


Рис. 4. Залежність потужності індуктора від напруги: 1 — розрахункова; 2 — експериментальна

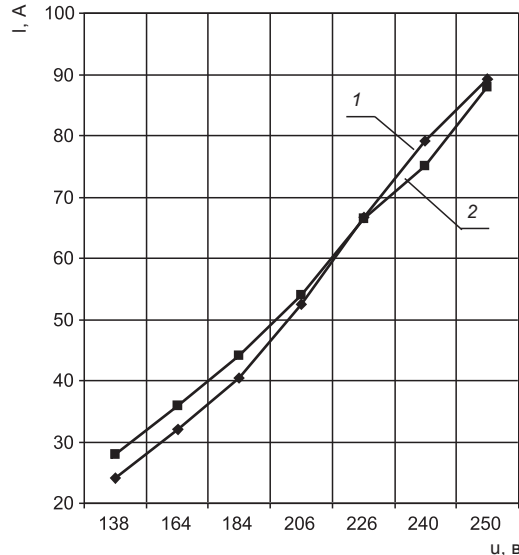


Рис. 5. Залежність струму індуктора від напруги: 1 — розрахункова; 2 — експериментальна

Враховуючи нелінійність магнітної проникності феромагнітного завантаження, проведено аналіз залежності ККД індуктора від кількості стрижнів у завантаженні (рис. 2). Аналіз показує, що обрана кількість стрижнів є близькою до оптимальної з погляду високого значення ККД (понад 90%) та виконання вимог вільного просипання зерен ріпаку крізь технологічний теплообмінник.

Зауважимо, що у запропонованій індукційній установці під час роботи індуктора від джерела живлення з напругою 220 В значення магнітної проникності є досить високим $\mu=10\mu_0$ (рис. 3) і не характерним для індукційного нагріву. Це пов'язано з технологічними особливостями індуктора та завантаження. Однак за такого незвичного режиму вдалося досягти заданих технологічних характеристик обладнання, а саме: активної потужності $P=4500$ Вт, струму в індукторі $I=62$ А. З урахуванням витрат на нагрів обмотки, ККД установки досяг 91%.

Для перевірки достовірності й адекватності розробленої методики розрахунку циліндричних індукторів із завантаженням у вигляді пучка стрижнів були проведені експериментальні дослідження індукційного обладнання за зміни

напруги живлення в межах 120–260 В. Установлено, що розрахована активна потужність індуктора для прийнятих електрофізичних характеристик (рис. 4, залежність 1) практично збігається з виміряною активною потужністю (рис. 4, залежність 2). Деяка розбіжність в експериментальних і розрахункових даних за напруги живлення понад 220 В пояснюється швидким нагрівом стрижнів і відповідним зниженням їхньої електропровідності. Така поведінка зміни потужності залежно від значення питомої електропровідності цілком прогнозована і відповідає розрахунковій методиці.

Аналогічна тенденція збігу розрахункових та експериментальних результатів спостерігається і на рис. 5, де наведено зміну струму залежно від напруги.

Отже, одним зі способів регулювання потужності установки, що важливо для режимів запуску обладнання, може бути здійснене за рахунок регулювання напруги живлення традиційним методом із застосуванням пічних трансформаторів. Регульовальна залежність під час застосування цього методу близька до лінійної для діапазону зміни напруги від 120 до 260 В з регульовальним коефіцієнтом $k \approx 17$ ($P=k \cdot U, Wm$).

Висновки

Розроблено індукційне обладнання для нагріву сипких та дисперсних матеріалів із застосуванням теплообмінної поверхні у вигляді пучка феромагнітних стрижнів з малим діаметром. Установлено, що виконання завантаження у вигляді пучка стрижнів з малим діаметром не є перешкодою для отримання ви-

соких енергетичних характеристик індукційного обладнання, що працює на промисловій частоті. Порівняння експериментальних і теоретичних результатів підтверджують високу достовірність розробленої методики розрахунку циліндричних індукторів із завантаженням у вигляді пучка стрижнів чи труб.

Бібліографія

1. Алферов К.В., Зенков Р.Л. Бункерные установки/К.В. Алферов, Р.Л. Зенков. — М.: Машгиз, 1955. — 308 с.
2. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое/А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков. — М.: Пищ. пром-сть, 1966. — 196 с.
3. Календарьян В.А. Теплоотдача плотного движущегося слоя/В.А. Календарьян, В.А. Карнерики. — К.: Вища шк., 1973.
4. Кондратенко І.П. Визначення геометричних параметрів розрахункової моделі циліндричного індуктора для нагріву феромагнітних труб/І.П. Кондратенко, А.О. Березюк//Вісн. НУБіП. — 2012. — № 174. — Ч. 1. — С. 125.
5. Кондратенко І.П. Енергетичні характеристики і електричні параметри індукторів для нагріву

- пучка феромагнітних труб/І.П. Кондратенко, А.П. Ращепкін, А.О. Березюк//Вісн. КДУ ім. Михайла Остроградського. — 2010. — № 3. — Ч. 2. — С. 62.
6. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 280 с.
7. Постников И.М. Проектирование электрических машин. — К., 1952. — 736 с.
8. Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунэр А.В. Установки индукционного нагрева: учеб. пособ. для вузов/Под ред. А.Е. Слухоцкого. — Л.: Энергоатомиздат, 1981. — 328 с.
9. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособ. для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976. — 544 с.