

УДК 502/504:664.7

А. А. БЕЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия»

В. Ф. СТОРЧЕВОЙ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

КОМБИНИРОВАННЫЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА

Рассмотрены вопросы термообработки фуражного зерна в поточном режиме за счет многократного комбинированного воздействия экзоэндогенного нагрева. Определены оптимальные режимы работы индукционных нагревательных устройств, необходимая производительность установки, удельная мощность СВЧ-генератора, добротность резонатора, критическая напряженность электрического поля.

Микронизация фуражного зерна, СВЧ-индукционная установка барабанного типа, энергия электромагнитных излучений, диэлектрический, кондуктивный и индукционный нагрев.

There are considered questions of thermal treatment of fodder grain in a line mode due to the repeated combined influence of exo-endogenous heating. There are defined: optimum operating modes of induction heating devices; necessary productivity of the installation, specific power of the generator microwave, good quality of the resonator, critical intensity of electric field.

Micronization of fodder grain, microwave induction installation of drum type, energy of electromagnetic radiations, dielectric, conductive and induction heating.

Для увеличения усвояемости и повышения пищевой ценности зерна и зернопродуктов применяют различные способы обработки, но все они достаточно энергоемкие и малопродуктивные [1]. Поэтому разработка технологии, позволяющей повысить эффективность функционирования установки для микронизации фуражного сырья, актуальна.

Исследования технологического процесса микронизации фуражного зерна осуществляли с помощью разработанной и изготовленной опытной установки. Известно, что электромагнитное поле сверхвысокой частоты, воздействуя на химические связи сложных соединений (белки и углеводы), способствует их ослаблению или разрыву. Новая технология микронизации зерна основана на эффекте декстринизации зерен крах-

мала (расщепление полисахаридов крахмала и переход их в усвояемые питательные вещества). Процесс микронизации наиболее эффективно действует на зерна бобовых культур.

Принцип действия предлагаемого микронизатора зерна основан на комплексном воздействии энергии электромагнитных излучений (ЭМИ) разных длин волн, направленных под определенным углом. Одновременное воздействие диэлектрического, кондуктивного и индукционного нагрева обеспечивает специфическое воздействие на фуражное зерно. В «капсуле» зерна осуществляется переход воды из жидкого состояния в парообразное. При высокой температуре (85...100 °С) и из-за высокого давления внутри зерна происходит механическое разрушение. Структура зерна становится более

пористой, рыхлой. Наряду с этим происходит уничтожение бактериальной микрофлоры при обеспечении определенной напряженности электрического поля СВЧ-диапазона.

Разработанная СВЧ-индукционная установка барабанного типа для микронизации зерна включает в себя загрузочный патрубок с заслонкой, установленный на верхнем основании цилиндрического корпуса (рис. 1) [2]. Внутри корпуса concentрически расположен секционный барабан. Секции барабана выполнены из ферромагнитного материала и образуют резонаторные камеры в виде треугольной призмы. Причем верхним и нижним основанием резонаторных камер являются основания цилиндрического экранирующего корпуса. Под нижним основанием цилиндрического корпуса установлены плиты индукционные с регулируемой мощностью. Секционный барабан приводится в движение от мотора-редуктора. Цилиндрический корпус установлен на монтажном столе. На нижнем основании цилиндрического корпуса имеется отверстие для заслонки выгрузного патрубка. На верхнем основании корпуса расположены СВЧ-генераторы, имеющие регуляторы мощности. Их число и мощность влияют на производительность установки. Толщину слоя фуражного зерна в отсеках барабана регулируют с помощью заслонки, находящейся в загрузочном патрубке. Микронизированное зерно выгружается через выгрузной патрубок. Корпус одновременно выполняет функцию экрана. Емкость резонаторной камеры оптимизирована в соответствии с частотой электромагнитного поля и необходимой напряженностью электрического поля. Высокая напряженность электрического поля (более 3 кВ/см) позволяет обеззараживать фуражное зерно, т. е. уничтожать бактериальную микрофлору вегетативной формы. Размеры зазоров для загрузки и выгрузки зерна согласованы с длиной волны с целью ограничения излучения ЭМП СВЧ. Доза воздействия ЭМП СВЧ на зерно и индукционный нагрев регулируются изменением мощности соответствующего источника и продолжительности обработки.

Основание экранирующего корпуса нагревается за счет индуктирования в них вихревых токов. При этом электрическая энергия преобразуется трижды: сначала при помощи индуктора она преобразуется в энергию переменного магнитного поля, которая в основании корпуса превращается в

энергию электрического поля (см. рис. 1); далее, под действием электрического поля в токопроводящем материале начинают двигаться заряды, т. е. энергия электрического поля превращается в тепловую энергию. На интенсивность и характер нагрева основания корпуса влияют частота тока, напряженность электрического и магнитного полей. Фуражное зерно нагревается косвенно, поэтому используют индукционный нагрев на частоте 50 Гц. При этой частоте сокращается расход энергии и не требуется преобразователь частоты. Источником индукционного нагрева основания экранирующего корпуса является плита индукционная марки HS-III-B26 мощностью 1,8 кВт.

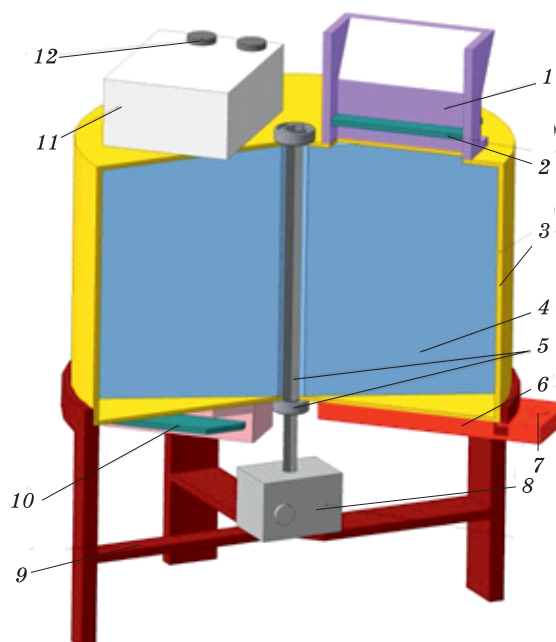


Рис. 1. Пространственное изображение СВЧ-индукционной установки барабанного типа для микронизации зерна: 1 – загрузочный патрубок; 2 – заслонка; 3 – цилиндрический корпус; 4 – секционный барабан; 5 – вал барабана; 6 – индукционная плита; 7, 12 – регуляторы мощности; 8 – мотор-редуктор; 9 – монтажный стол; 10 – выгрузной патрубок; 11 – СВЧ-генератор

Ниже приведена методика теплового расчета индукционного нагревательного устройства. Проектируемое индукционное нагревательное устройство под стеклокерамическим покрытием содержит индуктор (первичная обмотка), представленный в виде спирально расположенной медной проволоки в горизонтальной плоскости.

Вторичная обмотка выполнена в виде основания экранирующего корпуса из ферромагнитного материала и находится над стеклокерамическим покрытием (рис. 2). Расчет основных параметров индукционного нагревателя состоит из двух частей: тепловой и электрической. При тепловом расчете определяют мощность нагревательного устройства, тепловые потери, частоту тока, продолжительность нагрева и термический КПД индуктора. Электрический расчет сводится к определению конструктивных параметров индуктора, электрических и энергетических характеристик нагревателя.

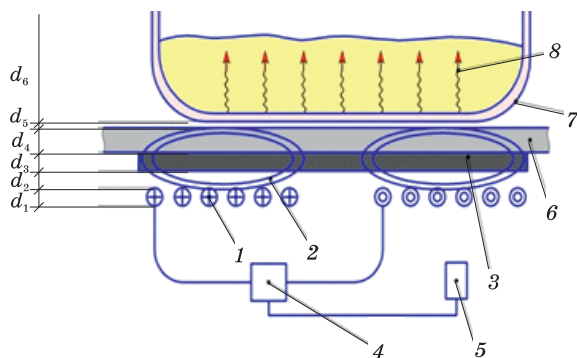


Рис. 2. Функциональная схема индукционного нагревательного устройства: 1 – индуктор (первичная обмотка); 2 – магнитное поле; 3 – стеклокерамическое покрытие; 4 – преобразователь частоты; 5 – электронный блок управления; 6 – основание экранирующего корпуса из ферромагнитного материала (вторичная обмотка); 7 – диэлектрический контейнер; 8 – тепловой поток в зерновой массе; 9 – резонаторная камера; d_1 – высота первичной обмотки; d_2 – зазор между первичной обмоткой и стеклокерамическим покрытием; d_3 – толщина стеклокерамического покрытия; d_4 – толщина ферромагнитной пластины; d_5 – воздушный зазор; d_6 – высота контейнера

Для анализа работы индукционного нагревательного устройства воспользовались Г-образной эквивалентной схемой замещения (рис. 3).

Она составлена по методике В. В. Москаленко в предположении, что насыщение магнитной системы не влияет на реактивное сопротивление обмоток, ток намагничивания зависит только от

приложенного напряжения. Зная максимальный ток, который протекает через ферромагнитное основание корпуса, находим мощность индуктора.

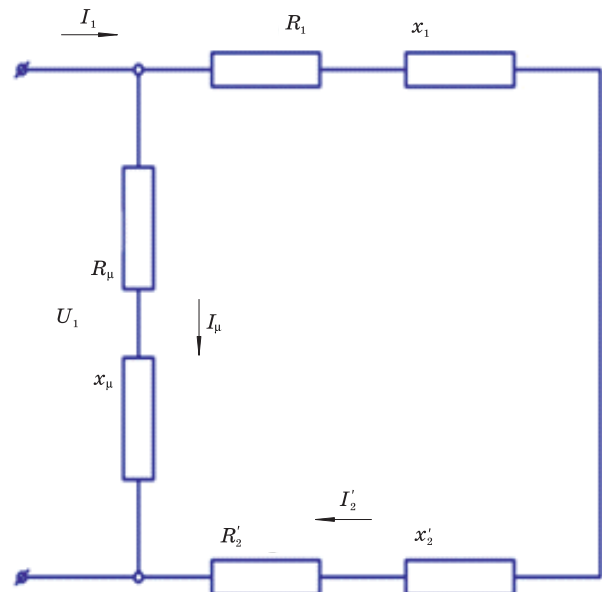


Рис. 3. Схема замещения индукционного нагревательного устройства: U_1 – напряжение на индукторе, В; I_1 – сила тока в индукторе, А; I_2' – ток, протекающий через ферромагнитное основание корпуса, приведенный к напряжению индуктора; I_μ – ток контура намагничивания; R_1, R_2' и R_μ – активные сопротивления соответственно индуктора, нагреваемого основания корпуса, приведенные к напряжению индуктора, и контура намагничивания, Ом; x_1, x_2' и x_μ – реактивные сопротивления соответственно индуктора, нагреваемого основания корпуса, приведенные к напряжению индуктора, и контура намагничивания, Ом

Напряжение на индукторе

$$U_1 = I_1 \sqrt{(R_1 + R_2') + (x_1 + x_2')} \quad (1)$$

Сопротивления:

$$R_2' = R_2 \omega^2; \quad x_2' = x_2 \omega^2; \quad R_2 = \rho_2 a / b z_{02}, \quad (2)$$

где ρ_2 – удельное электрическое сопротивление нагреваемого основания корпуса, Ом·м; S – площадь части основания (a и b – длина и ширина), м²; z_{02} – эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в нагреваемый металл, м.

Активное сопротивление нагреваемого основания, приведенное к напряжению индуктора, Ом:

$$R_2' = R_2 \omega^2 = \rho_2 \cdot a / b \cdot z_{02}. \quad (3)$$

Мощность, подводимая к индуктору,

Вт:

$$P_1 = (I_1')^2 (R_1 + R_2'). \quad (4)$$

Приведенный максимальный ток, протекающий через ферромагнитное основание корпуса:

$$I'_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2) + (x_1 + x'_2)}} \quad (5)$$

Мощность, потребляемая индуктором из сети $P_{\text{общ}}$, расходуется на потери в контуре намагничивания P_{μ} , потери в индукторе P_1 и преобразуется в электромагнитную мощность P_2 , позволяющую нагреть основание экранирующего корпуса.

Электромагнитная мощность, Вт:

$$P_2 = (I'_2) \cdot R'_2 = \frac{U_1 \cdot R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (6)$$

Мощность расходуется на нагрев фуражного зерна $P_{\text{пол}}$, транспортирующего контейнера $P_{\text{вспом}}$ и экранирующего корпуса $P_{\text{экр}}$, на компенсацию тепловых потерь через экранирующий корпус в окружающую среду $P_{\text{окр.ср}}$:

$$P_2 = P_{\text{пол}} + P_{\text{вспом}} + P_{\text{экр}} + P_{\text{окр.ср}} \quad (7)$$

Полезная мощность, Вт:

$$P_{\text{пол}} = \frac{c_{\text{тв}} \cdot m_{\text{тв}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{н}})}{t} \quad (8)$$

где $c_{\text{тв}}$ – удельная теплоемкость фуражного зерна, кДж/кг·°С; $m_{\text{тв}}$ – масса зерна, находящегося над нагреваемой площадью основания корпуса, кг; $T_{\text{к}}$ и $T_{\text{н}}$ – температура фуражного зерна соответственно в конце и начале нагрева, °С; t – продолжительность нагрева, с.

Мощность, идущая на нагрев диэлектрического контейнера и экранирующего корпуса:

$$P_{\text{вспом}} = \frac{c_{\text{плос}} \cdot m_{\text{плос}} \cdot (T_{\text{к1}} - T_{\text{н1}})}{t} + \frac{c \cdot m_{\text{экр}} \cdot (T_{\text{к2}} - T_{\text{н2}})}{t} \quad (9)$$

где $c_{\text{плос}}$, $c_{\text{экр}}$ – удельная теплоемкость диэлектрического контейнера и экранирующего корпуса, кДж/кг·°С; $m_{\text{плос}}$, $m_{\text{экр}}$ – масса контейнера и корпуса, кг; $T_{\text{к1}}$, $T_{\text{н1}}$ и $T_{\text{к2}}$, $T_{\text{н2}}$ – температура контейнера и корпуса соответственно в конце и начале процесса нагрева, °С.

На основе дифференциального уравнения теплового баланса выведено уравнение нагрева фуражного зерна, что позволило оценить приращение температуры за промежутки времени транспортирования сырья поверх ферромагнитного основания корпуса, нагретого до необходимой температуры.

Ниже представлена методика согласования конструктивных параметров с режимами работы СВЧ-генератора (рис. 4):

1. Анализ годового объема обрабатываемого сырья для определения производительности установки (Q)

2. Анализ диэлектрических и физико-механических характеристик сырья

ϵ – диэлектрическая проницаемость сырья; $\text{tg } \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь сырья; c – удельная теплоемкость сырья, кДж/кг·°С; ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (8,85 10⁻¹² Ф/м); ρ – плотность сырья кг/м³; f – частота, МГц

3. Глубина проникновения энергии электромагнитных излучений СВЧ диапазона в сырье

$$\gamma = \frac{9,55 \cdot 10^9}{\text{tg} \delta \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon}}, \text{ см} \quad (1)$$

4. Объем загрузки сырья в резонаторную камеру (линейный размер сырья не должен превышать удвоенного значения глубины проникновения энергии ЭМИ)

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{ген}}}{V_1}, \text{ Вт/м}^3, \quad P_{\text{уд}} = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\eta}, \text{ Вт/м}^3 \quad (2)$$

6. Напряженность электрического поля

$$E = \sqrt{\frac{P_{\text{уд}}}{0,55 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \text{tg} \delta \cdot f}}, \text{ В/м}, \quad (3)$$

где $P_{\text{уд}}$ – удельная мощность генератора, Вт/м³

7. Собственная добротность резонаторной камеры

$$Q^{\text{НОП}} = \frac{1}{\Delta} \cdot \frac{a \cdot l}{(2 \cdot a - l) \cdot \left(\frac{\lambda_0}{2 \cdot l}\right)^2 + l}; \quad Q^{\text{ЕОП}} = \frac{1}{2 \cdot \Delta} \cdot \frac{l \cdot a}{l + a}, \quad (4)$$

где P – мощность источника СВЧ энергии, Вт; λ_0 – критическая длина волны, см; a , l – соответственно диаметр и длина объемного резонатора, см

8. Объем резонаторной камеры

$$V = \frac{Q_0 \cdot P_{\text{ген}}}{1,7 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E \cdot f}, \text{ м}^3, \quad (5)$$

где Q_0 – собственная добротность резонаторной камеры; $P_{\text{ген}}$ – мощность источника СВЧ-излучения, Вт

9. Мощность диэлектрического нагрева микроорганизмов при разных напряженностях электрического поля

$$P = V_{\text{м}} \cdot (E^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \omega \cdot \text{tg} \delta) / 4 \cdot \pi, \text{ Вт}, [1] \quad (7)$$

где E – напряженность электрического поля в сырье, В/м (200...10000 В/см); $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, 1/с; $V_{\text{м}}$ – объем микроорганизма, м³; ϵ , $\text{tg} \delta$ диэлектрические параметры воды при частоте 2450 МГц

10. Мощность тепловых потерь с поверхности микроорганизма

$$q_{\text{теп}} = \lambda \cdot S \cdot \text{grad } T, \text{ Вт}, \quad (8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности (для воздуха $\lambda = 0,023$ Вт/м·°К); S – площадь поверхности микроорганизма, м²; $\text{grad } T$ – градиент температуры (разница температур между микроорганизмом и окружающим воздухом, отнесенный к радиусу микроорганизма), К

11. Критическая напряженность электрического поля для затормаживания развития микроорганизмов

$$E_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2(\lambda \cdot s \cdot \text{grad } T)}{\epsilon_{0\text{м}} \cdot \text{tg} \delta \cdot \epsilon \cdot f \cdot V}}, \text{ В/м}, \quad (9)$$

$E_{\text{кр}}$ – критическая напряженность электрического поля, В/м; V – объем волновода, м³; E – напряженность электрического поля, В/м

Рис. 4. Методика согласования конструктивных параметров с режимами работы СВЧ-генератора

Из анализа годового объема обрабатываемого сырья l определяем необходимую производительность установки, удовлетворяющей цеху средней мощности (см. рис. 4). Далее на основе анализа диэлектрических и физико-механических характеристик

фуражного зерна 2 на выбранной частоте электромагнитного поля вычисляем глубину его проникновения 3, с тем чтобы определить объем загружаемого сырья 4 в резонаторную камеру. Это позволит оценить удельную мощность СВЧ-генератора 5 двумя способами: 1) если известна полезная мощность источника энергоподвода; 2) если известны плотность и теплоемкость фуражного зерна для определенной скорости нагрева. Эти значения удельных мощностей следует выровнять, варьируя массой загрузки, с одной стороны, и скоростью нагрева, с другой стороны. Затем вычисляем напряженность электрического поля 6, соответствующую этой удельной мощности. Определяем собственную добротность резонатора 7 по предложенной авторами формуле и согласовываем с его объемом 8. Для оценки степени обеззараживания фуражнозерна определяем критическую напряженность электрического поля 11, при которой происходит выравнивание мощности диэлектрического нагрева микроорганизмов 9 и мощности тепловых потерь 10 с поверхности микроорганизма.

Вывод

Разработана методика термообработки фуражного зерна в поточном режиме за счет многократного комбинированного воздействия экзо-эндогенного нагрева. Методика реализована в СВЧ-индукционной установке с рабочей камерой, образованной цилиндрическими объемными резонаторами и индукционными нагревательными устройствами, расположенной под экранирующим корпусом.

1. Установка для обработки кормового зерна: А. с. 904643 СССР, МКИ А 23 К 1 / 20/ Р. Р. Денисова [и др.]. – № 2969205; заявл. 06.08.80; опубл. 15.02.82 – 3 с.

2. СВЧ-индукционная установка барабанного типа для микронизации зерна: пат. № 2489068 РФ А23N17/00. – № 2012100432; заявл. 16.01.12; опубл. 10.08.13. – Бюл. № 22. – 14 с.

Материал поступил в редакцию 09.04.14.

Белов Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент
Тел. 8-352-415-809

Сторчевой Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор
Тел. 8 (499) 976-21-50

E-mail: storchevoy@timacad.ru

УДК 502/504:621.79

А. П. ШНЫРЁВ, П. В. ГОЛИНИЦКИЙ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОМ НАПЕКАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ НА БРОНЗОВЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Приведены способы улучшения напеченного слоя. Дан ряд рекомендаций.

Подшипники скольжения, напекание стальных порошков.

There are given methods of improving the baked layer. There is given a number of recommendations.

Sliding bearing, baking of steel powders.

При эксплуатации сельскохозяйственных и мелиоративных машин неизбежно возникают неисправности и отказы, связанные с тяжелыми условиями работы. Для предприятий, обладающих ограниченным парком техники, выход из строя одной машины может привести к срыву запланированных видов работ и значительному увеличению экономических потерь.

В большинстве случаев основной при-

чиной выхода из строя деталей и узлов сельскохозяйственной и мелиоративной техники является износ сопрягаемых поверхностей. При разработке ремонтной технологии особое внимание уделяют повышению износостойкости восстанавливаемых деталей по сравнению с новыми.

В последние годы для восстановления поверхностей тел вращения применяется электроконтактное напекание. Существует