

Расчетные данные для определения суммарного годового экономического эффекта

№ п/п	Наименование показателя, руб.	Предлагаемая машина	Количество яиц, тыс. шт.
1	$\Delta Z_{\text{Э}}^{\text{год}}$	76 800	437,6
2	D_1	76 600	437,6
3	D_2	1 206 800	6 647,1
4	D_3	501 900	7 060
5	$\text{Э}_{\text{год}}$	1 862 100	14 144,7

Библиографический список

1. Болтенков И.М., Афанасьев Ш.К. Оборудование для промышленной переработки яиц: обзорная информация. – М.: Мясная индустрия, 1972. – 56 с.

2. ГОСТ Р 52121-2003. Яйца куриные пищевые. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 7 с.

3. ГОСТ 23729-88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки специализированных машин. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 9 с.

4. Экономическая эффективность механизации сельскохозяйственного производства / А.В. Шпилько, А.В. Драгайцев, Н.М. Морозов и др. – М.: Изд-во Россельхозакадемии, 2001. – 346 с.

5. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники: в 2 ч. – М.: Изд-во Минсельхозпрода РФ, 1998. – Ч. 1. – 219 с.



УДК 631:362.7

**В.И. Курдюмов,
А.А. Павлушин,
Г.В. Карпенко,
С.А. Сутягин**

**О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ
В УСТАНОВКАХ КОНТАКТНОГО ТИПА ДЛЯ СУШКИ ЗЕРНА**

Ключевые слова: зерносушилка, энергосбережение, контактный способ передачи теплоты, теплоноситель, агент сушки, топочные газы, структурная схема установки.

Введение

В зависимости от того, как теплота передается объекту сушки, различают следующие способы сушки: конвективный, контактный, лучистый, электрический (токами высокой частоты), молекулярный (сублимацией). Кроме того, в настоящее время всё большее распространение получают высокопроизводительные и эко-

номичные комбинированные способы сушки материалов: конвективно-лучистый, лучисто-высокочастотный, сублимационно-лучистый и другие.

Конвективный способ наиболее распространён для сушки зерна, кормов и других сельскохозяйственных материалов, которые хорошо переносят сравнительно высокие температуры. Теплота, необходимая для нагрева и испарения из материалов влаги, передается от движущегося газообразного теплоносителя, которым служит нагретый воздух или, чаще, смесь воздуха с топочными газами.

Топочные газы, образующиеся при сжигании газообразного топлива, применяют в качестве теплоносителей очень широко, так как они позволяют нагревать высушиваемый продукт до высоких температур. К недостаткам топочных газов следует отнести трудность регулирования температуры, низкий коэффициент теплоотдачи от газа к стенке, отложение на теплопередающих поверхностях сажи, что приводит к увеличению термического сопротивления, а также наличие в них вредных продуктов сгорания.

Кроме того, газ как топливо обладает рядом существенных недостатков: в определенной пропорции с воздухом он образует взрывоопасную смесь; горючие газы, особенно искусственные, загрязняют сырье, подвергаемое сушке, токсичными продуктами неполного сгорания газа.

Возможность использования контактного нагрева для сушки зерна подтверждена рядом исследований [1-3]. В качестве нагретой поверхности могут быть использованы трубы, обогреваемые паром, горячей водой, электричеством или газом. Скорость контактной сушки зависит от температуры греющей поверхности и толщины зернового слоя. Контактную сушку используют на мукомольных и крупяных заводах, главным образом, для подогрева зерна и небольшого снижения влажности при подготовке его к переработке.

Стоимость 1 кДж теплоты, получаемой при сжигании газа, в настоящее время практически соизмерима со стоимостью теплоты, получаемой при использовании электроэнергии.

С развитием конструкций электронагревательных элементов возникают предпосылки для их применения в установках для сушки зерна с контактным способом передачи теплоты на более высоком технологическом и энергетическом уровнях.

Для обеспечения заданных параметров процесса сушки, соблюдения эксплуатационных, технологических требований установки для сушки зерна должны включать в себя следующие элементы (рис. 1): 1 – устройство загрузки; 2 – генератор теплоты; 3 – теплопередающий и теплоотдающий элемент; 4 – устройство отвода образовавшейся влаги и подвода сухого воздуха; 5 – устройство выгрузки; 6 – устройство управления и контроля режимами тепловой обработки.

Вышеперечисленные элементы должны входить в состав разрабатываемых уста-

новок. Основной конструкции контактной установки для сушки зерна является теплообменный аппарат с электрическими источниками теплоты и транспортирующий рабочий орган.

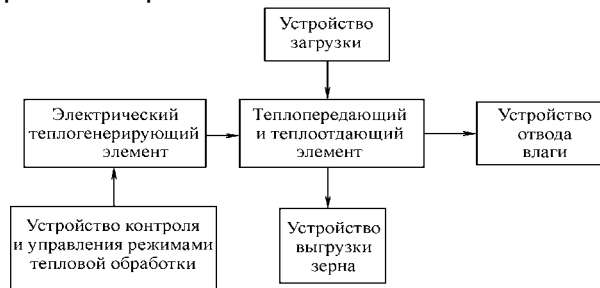


Рис. 1. Структурная схема контактной электроустановки для сушки зерна

Для решения задач, поставленных перед сушкой, на основании глубокого изучения и анализа существующих средств механизации нами предложены следующие конструктивно-технологические схемы установок для сушки зерна, в основе которых лежит принцип контактного нагрева тонкого слоя движущегося продукта в теплоизолированном кожухе (рис. 2).

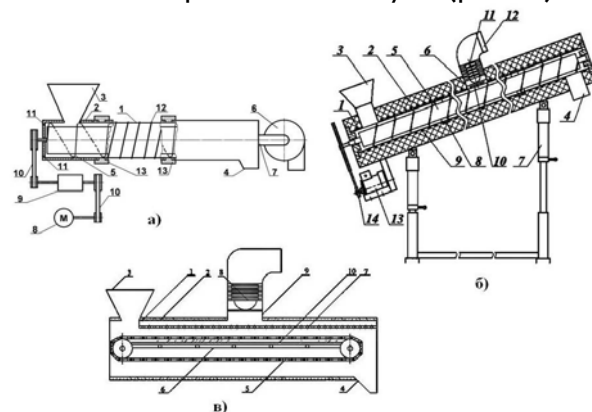


Рис. 2. Схемы установок для сушки зерна:

- а) 1 – кожух; 2 – теплоизоляция; 3 – бункер загрузочный; 4 – окно выгрузное; 5 – шнек; 6 – вентилятор; 7 – воздуховод; 8 – электродвигатель; 9 – вариатор; 10 – передача ременная; 11 – отверстия; 12 – элементы нагревательные; 13 – кольца;
- б) 1 – кожух; 2 – слой теплоизоляции; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – транспортирующий рабочий орган; 6 – воздуховод; 7 – винтовые опоры; 8 – разделительное кольцо; 9, 10 – нагревательные элементы; 11 – вентилятор; 12 – патрубков; 13 – двигатель; 14 – передача; в) 1 – кожух; 2 – теплоизоляция; 3 – бункер загрузочный; 4 – выгрузное окно; 5 – транспортер; 6 – нагревательные элементы; 7, 10 – пластины; 8 – вентилятор; 9 – воздуховод

Методы исследований

Предложенные установки контактного типа для сушки зерна исследованы в лабораторных и производственных условиях в соответствии с действующими ГОСТами, ОСТами и разработанными частными методиками. Данные опытов, полученные с использованием методики планирования экспериментов, статистически обработаны с помощью программ Excel, Statistika-6 и Derive-5. Достоверность результатов работы подтверждена сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, проведением сравнительных исследований установок в лабораторных и производственных условиях.

Экспериментальная часть

Скорость передачи теплоты Q_T от стенки кожуха сушильной установки к материалу зависит от коэффициента теплоотдачи α поверхности контакта высушиваемых частиц материала с кожухом

$F (F = \sum_{i=1}^n F_i)$ и разности температур кожуха и материала $t_k - t_m$ (температурного напора):

$$Q_T = \alpha F (t_k - t_m),$$

где Q_T – количество теплоты, переданное от стенки кожуха сушильной установки к материалу, Дж;

α – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²·ч·°С);

F – площадь поверхности контакта частиц высушиваемого материала с кожухом, м²;

t_k, t_m – соответственно, температура кожуха и материала, °С.

Для определения затрат теплоты в разработанной установке установим массу удаляемой влаги [5].

Масса влаги m_g , испарённой из зерна, равна разности масс зерна до сушки – m_1 и после сушки – m_2 , т.е.

$$m_g = m_1 - m_2. \quad (1)$$

Преобразуя уравнение (1), получим массу удалённой влаги:

$$m_g = m_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2}. \quad (2)$$

Расход теплоты Q_T примем пропорциональным массе испарённой влаги, т.е.

$$Q_T = \kappa_T m_g, \quad (3)$$

где κ_T – коэффициент пропорциональности, МДж/кг испарённой влаги.

При сушке продовольственного зерна колосовых культур в зерносушилках $\kappa_T \approx 4,5-5$ МДж/кг испарённой влаги при снижении влажности с 20 до 14%. При сушке семенного зерна коэффициент κ_T больше в 2 раза, крупяных, бобовых и риса – в 1,5-2 раза.

В общем виде расход теплоты, кДж/кг, на нагрев зерна:

$$Q_T = \frac{GC}{W_c} (t_1 - t_0), \quad (4)$$

где G – количество зерна, выходящего из зоны сушки, кг/ч;

C – теплоёмкость зерна при выходе из зоны сушки, кДж/(кг·°С);

W_c – масса испарённой за 1 ч влаги, кг/ч;

t_0, t_1 – температура зерна, соответственно, до и после нагрева, °С.

Теплоёмкость зерна при выходе из зоны сушки:

$$C = \frac{(100 - \omega)C_c + \omega C_\omega}{100}, \quad (5)$$

где $C_c = 1,55$ Дж/(кг·°С), $C_\omega = 4,19$ Дж/(кг·°С) – соответственно, теплоёмкость сухого вещества зерна и воды;

ω – влажность зерна при выходе из зоны сушки, %.

При пониженной температуре воздуха ($t < 0^\circ\text{C}$) расход теплоты на нагрев зерна:

$$Q_T = \frac{G}{W_c} \left(C t_1 + \frac{100 - \omega}{100} C_c t_0 \right) + \frac{G_0}{W_c} \left[\left(1 - \frac{100 - \omega}{100 - \omega_0'} \right) \cdot (334 + 2,1 t_0) + \frac{\omega_0'}{100} C_\omega t_0 \right],$$

где G_0, G – соответственно, масса зерна, входящего в зону сушки и выходящего из нее в единицу времени, кг/ч;

ω_0, ω_0' – соответственно начальная и критическая влажность зерна, % (для практических расчётов ω_0' принимают равным предельному значению средней сухости);

334 – скрытая теплота плавления льда, кДж/кг;

2,1 – теплоёмкость льда, кДж/(кг·°C).

Физическая сущность контактного электрического нагрева заключается в том, что электрический ток, проходя по проводнику, нагревает его [4]. Количество теплоты, Дж, выделяющейся в проводнике:

$$Q_T = I^2 R t = I^2 \rho l t / S, \quad (6)$$

где I – сила тока, А;

R – сопротивление проводника, Ом;

t – время нагрева, с;

ρ – удельное сопротивление материала проводника, (Ом·мм²)/м;

l – длина проводника, м;

S – поперечное сечение проводника, мм².

Обычно удельное сопротивление металлов определяют при температуре 20°С и пересчитывают для требуемой температуры по формуле:

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha_t (t + 20)],$$

где ρ_t – удельное сопротивление при заданной температуре, (Ом·мм²)/м;

ρ_{20} – удельное сопротивление при 20°С, (Ом·мм²)/м;

α_t – температурный коэффициент.

Теоретическое количество теплоты, Дж, необходимое для нагревания материала при определённом перепаде тем-

пературы $(t_k - t_m)$ пропорционально массе материала и его теплоёмкости:

$$Q_T = m_1 C (t_k - t_m). \quad (7)$$

Потребная мощность электронагревателя, кВт:

$$P = \frac{Q_T}{3,6 \cdot 10^3 t \eta_T},$$

где t – время нагрева, с;

η_T – термический коэффициент полезного действия установки (для теплоизолированной установки $\eta_T = 0,9-0,95$ для неизолированной $\eta_T = 0,7-0,8$).

Для установок непрерывного действия:

$$\eta_T = \frac{A_n}{A_n + A_a + A_c},$$

где A_n – полезные затраты тепловой энергии, $A_n = C \rho V (t_k - t_n) \cdot 10^3$, Дж;

A_c – потери энергии в окружающую среду за время нагрева, Дж;

A_a – потери энергии на нагрев конструктивных элементов установки, Дж:

$$A_a = C \rho_3 V (t_k - t_n) \cdot 10^{-3},$$

где ρ_3 – насыпная плотность зерна, кг/м³;

V – объём зерна, м³.

Потери в окружающую среду цилиндрического кожуха сушильной установки при установившемся тепловом режиме:

$$P_u = \frac{\pi (t_k - t_n) L}{D \alpha + \frac{1}{2 \lambda_1} \ln \frac{D_1}{D_2} + \frac{1}{2 \lambda_2} \ln \frac{D_2}{D_1} + \dots + \frac{1}{2 \lambda_n} \ln \frac{D_n}{D_{n-1}} + \frac{1}{D_n \alpha'}}, \quad (8)$$

где α – коэффициент теплопередачи от внутренней поверхности кожуха установки к высушиваемому материалу, Дж/(м²·ч·°C);

λ_i – коэффициент теплопроводности соответствующего слоя ($i = 1, 2, 3 \dots n$) Вт/(м·град);

α' – коэффициент теплоперехода от внешней поверхности кожуха к наружной среде, Вт/(м²·град);

t_n – температура окружающего воздуха, °C;

D – внутренний диаметр кожуха, м;

D_i – внешний диаметр i -того слоя, м;

L – длина нагреваемого участка кожуха, м.

Средняя температура t_i i -го слоя цилиндрического кожуха сушильной установки

$$t_i = t_n + \frac{P_u}{\pi L} \left[\frac{1}{D_n \alpha'} + \frac{1}{2 \lambda_n} \ln \frac{D_n}{D_{n-1}} + \frac{1}{2 \lambda_{n-1}} \ln \frac{D_{n-1}}{D_{n-2}} + \dots + \frac{1}{2 \lambda_1} \ln \frac{1}{2} \left(1 - \frac{D_i}{D_{i-1}} \right) \right].$$

Потребную мощность, Вт, можно определить, зная A' – удельный расход энергии, кВт·ч, на единицу массы или объёма высушиваемого материала, и пропускную способность q установки в единицах массы или объёма в час, то есть:

$$P_y = qA',$$

или, зная удельные теплотери нагреваемого объекта ΔP при $t = \text{const}$ в Вт на расчётную площадь $S_{\text{ст}}$, или объёма V объекта и на превышение θ внутренней температуры греющей поверхности над внешней, т.е.:

$$P_y = \Delta P S_{\text{ст}} \theta \text{ или } P_y = \Delta P V \theta.$$

Минимальную толщину тепловой изоляции $\delta_{\text{и}}$, м, находят из условия минимума суммы годовых затрат, приходящихся на 1 м^2 изоляции.

Для цилиндрического кожуха установки экономически наивыгоднейшее значение толщины изоляции определяют из равенства:

$$f(D_2) = f_1(D_2)$$

или из соответствующего выражения:

$$\left(\frac{1}{\alpha D} + \frac{1}{\alpha' D_2} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_1}{D} + \frac{1}{2\lambda_u} \ln \frac{D_2}{D_1} \right)^2 = \frac{n\theta S_3}{15,7 p S_u D_2^2} \left(\frac{1}{2\lambda_u} - \frac{1}{\alpha' D_2} \right),$$

где S_3 – годовой расход на электроэнергию, руб.;

$S_{\text{и}}$ – годовой расход на изоляцию, руб.;

α и α' – коэффициенты теплоперехода, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$);

p – годовые отчисления на амортизацию тепловой изоляции, %;

θ – расчётный перепад температур греющей поверхности установки и окружающего воздуха за сезон, °C ;

p – время работы зерносушилки в год, ч;

λ_c, λ_u – соответственно, коэффициенты теплопроводности материала кожуха и тепловой изоляции, Вт/($\text{°C} \cdot \text{м}$);

D_1 – внутренний диаметр цилиндрического слоя тепловой изоляции (внешний диаметр кожуха), м;

D_2 – внешний диаметр слоя изоляции, м.

Таким образом, энергия в процессе тепловой обработки зерна в установке в основном затрачивается на нагрев зерна и удаление влаги с его поверхности. При этом важно минимизировать потери энергии в окружающую среду и на нагрев конструктивных элементов установки посредством теплоизоляции.

Контактный электротеплообменник позволяет создать любое распределение энергии и температурного поля по объёму теплообменника, что дает возможность выбрать оптимальный режим тепловой обработки зерна с учетом технологических требований.

Для подтверждения теоретических предпосылок применения контактного способа передачи теплоты с электрическим нагревом контактирующей с зерном поверхности нами разработана и создана лабораторная установка.

Результаты и их обсуждение

В результате эксперимента при сушке зерна пшеницы были выявлены оптимальные значения независимых факторов, при которых затраты теплоты на испарение из зерна влаги составляют 3102,8 кДж/кг: средняя температура греющей поверхности 58°C , скорость движения воздуха в установке 5,44 м/с, скорость движения зерна 0,033 м/с при пропускной способности установки 250 кг/ч. Для зерна ржи $v_{\text{з опт}} = 0,033 \text{ м/с}$, а средняя температура греющей поверхности $t_{\text{п опт}} = 61 \text{°C}$ при $q_{\text{опт}} = 3164 \text{ кДж/кг}$ и пропускной способности установки 250 кг/ч.

Для подтверждения возможности использования установок контактного типа с электронагревом для сушки зерна в небольших крестьянско-фермерских, личных подсобных и зерноперерабатывающих хозяйствах, для уточнения теоретических основ процесса сушки зерна и проектирования установок, а также для установления границ экономически эффективного использования таких установок при оптимизированных конструктивных параметрах и режимах её работы, были проведены исследования предложенных установок в производственных условиях.

Испытываемые установки представляли собой модуль тепловой обработки зерна, входящий в технологическую линию по послеуборочной обработке зерна (сушке) (рис. 3).



Рис. 3. Технологическая линия послеуборочной обработки зерна

Выводы

Производственные исследования предлагаемой установки для сушки зерна подтвердили её высокую эффективность. Расхождения значений основных показателей процесса сушки зерна, полученных в производственных и лабораторных условиях, не превысили 5%. Выявлено, что при сушке зерна пшеницы средняя температура греющей поверхности составляла 40–75°C, съём влаги за один проход находился в пределах 2–6%, температура зерна на выходе из установки составляла 30–40°C. При этом затраты теплоты на

1 кг испаренной влаги изменялись от 2,7 до 3,4 МДж.

Результаты технико-экономического анализа предлагаемой установки в сравнении с установками для сушки зерна СЗПБ-2,5 (и ПУФС-0,4) показали, что предлагаемая установка имеет меньшие энергоёмкость и металлоёмкость. Годовая экономия составила 29 тыс. руб., а экономический эффект – более 100 руб. на 1 т продукции.

Библиографический список

1. Кришер О. Научные основы техники сушки. – М.: ИЛ, 1961. – 213 с.
2. Патент РФ № 2323580. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; Оpubл. 10.05.2008 г. Бюл. № 13.
3. Патент РФ № 2371650. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.Н. Зозуля; Оpubл. 27.10.2009 г. Бюл. № 30.
4. Рубцов П.А., Осетров С.П. Применение электрической энергии в сельскохозяйственных процессах. – М.: Колос, 1971. – 257 с.
5. Уваров А.М. Сушка зерна. – М.: Госторгиздат, 1937. – 294 с.



УДК 631.4:631.51

**В.С. Нестяк,
К.Т. Мамбеталин**

МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

Ключевые слова: почва, почвенная система, обработка почвы, процесс разрушения, энергия разрушения, принцип воздействия, сжатие, растяжение, реологические свойства, реологическая модель, структурная вязкость.

Введение

В основе существующих способов обработки почвы лежит механическое воздействие рабочих органов на почву сжатием. Несмотря на значительный теоретический и экспериментальный материал,