



**“Fizika-2005”
Beynəlxalq Konfrans
International Conference
Международная Конференция**



7 - 9 İyun 2005 №153 səhifə
June 2005 page 590-594
Июнь стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

**СИСТЕМА ПОДОГРЕВА ЗЕРНА НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЕЙ**

ПУГАЧЕВ Г.А., ХАЛИНА Т.М., ХАЛИН М.В.

*Алтайский Государственный Технический Университет,
Россия, г.Барнаул*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема подогрева зерна в зерноперерабатывающей промышленности неизменно остается актуальной, так как представляет собой энергозатратный и сложный технологический процесс. Так, например, аппарат для подогрева зерна БПЗ обеспечивает подогрев зерна от -5 до $+15^{\circ}\text{C}$ при производительности $3,5 \div 4,0$ т/ч за счет сухого насыщенного пара, расход которого составляет около 110 кг/ч. Для приготовления такого объема теплоносителя необходимо затратить тепловой энергии около $300 \cdot 10^3$ кДж, что эквивалентно установленной мощности аппарата ~ 85 кВт. При эксплуатации воздушно-водяного кондиционера расход тепловой энергии для подогрева 1 т/ч зерна составляет 55,8 кВт [1].

Аналогичные устройства, а также известные способы подогрева зернового материала обладают как общими, так и конкретными для каждого случая недостатками:

- низкой эффективностью процесса подогрева зернового материала, обусловленной высокими энергозатратами при больших потерях тепловой энергии, связанных с применением вторичного энергоносителя, в качестве которого используют насыщенный пар, и отсутствием возможности обогрева любого пути прохождения зернового материала;
- отсутствием автоматического управления процессом подогрева зернового материала, обусловленным исключением возможности регулирования температуры последнего при контактировании со стенками кольцевых паропроводов;
- повышенной материалоемкостью оборудования, реализующего способ, из-за необходимости использования кольцевых паропроводов с вмонти-

рованными трубами для пропуска насыщенного пара и коммуникаций подачи пара под давлением;

- повышенной трудоемкостью технического обслуживания оборудования и исключением возможности использования вышеперечисленных способов в фермерских хозяйствах, малых мельницах при отсутствии котельных, что связано с необходимостью нагрева замкнутого объема транспортирования зернового материала изнутри кольцевыми паропроводами;
- невысоким к.п.д., составляющим 35 - 40 %.

Предлагается система электрообогрева зерна на базе многоэлектродных композиционных электрообогревателей МКЭ объемного типа МКЭ-2 и пластинчатых МКЭ-1 [2-5].

Предварительный анализ показал, что в этом случае при заданной производительности значительно снижаются энергоемкость и металлоемкость процесса подогрева зерна, повышается в 2÷3 раза к.п.д. установки, сокращаются затраты на техническое обслуживание.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ШНЕКОВОГО ПОДОГРЕВА

Существующая технологическая схема на примере ЗАО «Союзмука» представлена на рисунке.

Зерно со склада через бункеры (1) поступает на аппараты подогрева зерна БПЗ (2), затем на двухсекционный винтовой транспортер (3) и далее через трехсекционный винтовой транспортер (4) на норию (5).

Производительность установки регулируется задвижками (6), а температура зерна контролируется датчиками (7-10), включенными в весь технологический процесс и имеющими выход

информации на головной компьютер (11). На шнеках (3) и (4) установлены электрообогреватели МКЭ-1 (12) и МКЭ-2 (13) соответственно.

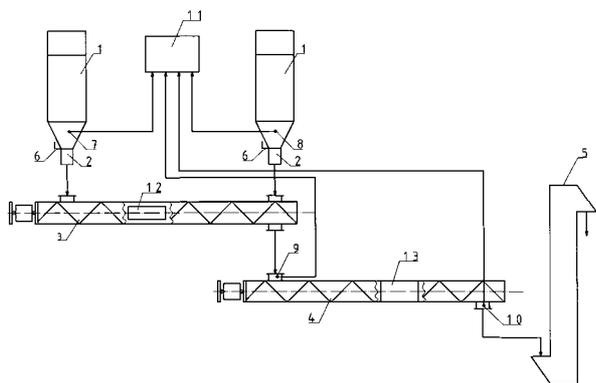


Рисунок. Технологическая схема подогрева зерна.

Анализ технологии подогрева зерна показал следующее:

- при заданной производительности устройства 7÷8 т/ч в холодное время года не обеспечивается выход подогретого зерна, свыше +12°C при температуре на датчиках 7 и 8, менее +4°C;
- температура поступающей в аппарат БПЗ воды не превышает +70°C;
- температура воды на выходе из аппарата БПЗ менее +40°C;
- разность показаний датчиков 9 и 10 составляет 1÷2°C в сторону уменьшения.

Для расчета разрабатываемой системы подогрева зерна необходимо составить энергетический баланс, то есть определить необходимую тепловую энергию при заданных производительности и температурном диапазоне зерна и соответствующую электрическую энергию с учетом потерь, которая будет затрачена при шнековом обогреве с использованием объемных

многоэлектродных композиционных электрообогревателей МКЭ-2, а также обогрев с дополнительной установкой пластинчатых электрообогревателей МКЭ-1 [5÷14].

С учетом технологической схемы (рисунок 1) рассчитаем энергетический баланс системы с использованием электрообогревателей МКЭ-1 и МКЭ-2.

Шнеки 3 и 4, диаметром 0,2 м, длиной 4 м и 6 м соответственно оборудованы лентами с пластинчатыми электрообогревателями МКЭ-1, в количестве 48 шт. и объемными трех- и пятиэлектродными электрообогревателями МКЭ-2, в количестве 14 шт., технические характеристики которых приведены в таблице 1.

Затраты тепловой энергии на подогрев зерна $Q_{н.з.}$ можно определить по формуле (1) [3]:

$$Q_{н.з.} = G_{ш} \cdot c_3 \cdot \Delta\theta', \quad (1)$$

где $G_{ш}$ – физическая производительность шнека, кг/с;
 c_3 – удельная теплоемкость зерна, Дж/(кг·К);
 $\Delta\theta'$ – разность температур зерна, К.

Установленная мощность МКЭ-1 и МКЭ-2 составляет соответственно: $P_3' = 35 \text{ Вт} \cdot 48 \text{ шт} = 1,5 \text{ кВт}$, $P_3'' = 150 \text{ Вт} \cdot 14 \text{ шт} = 2,1 \text{ кВт}$.

Производительность винтового транспортера (шнека) рассчитываем по формуле [3]:

$$G_{ш} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot n \cdot 60 \cdot t \cdot \rho_{нас} \cdot K_{зап}, \quad (2)$$

где D – внутренний диаметр шнека, м;
 n – угловая скорость вращения шнека, мин⁻¹;
 t – шаг шнека, м;
 $\rho_{нас}$ – расчетная плотность зерна, кг/м³;
 $K_{зап}$ – коэффициент заполнения шнека.

Таблица 1. Технические характеристики электрообогревателей МКЭ

№	Параметр	Электрообогреватель МКЭ	
		объемный	пластинчатый
1	Габариты (внутренний диаметр/внешний диаметр), мм	Ø200/Ø240x300x12	200x135x10
2	Напряжение, В	380/220±10%	220±10%
3	Мощность $P_{н.}$, Вт	150±15	35±3,5
4	Температура на поверхности T , °C при $T_{окр.ср.} = +18$ °C	50±5	70±5
5	Удельная мощность, не более, Вт/м ²	1000	1200
6	Сопротивление изоляции, не менее, МОм	1000	1000
7	Напряжение пробоя, не менее, кВ	4,5	9
8	Ток утечки, не более, А	$75 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6}$
9	Наработка на отказ, не менее, ч	10000	50000
10	Масса, кг	3,2±2%	0,315±2%

Удельную теплоемкость зерна определяем на основании справочных данных по таблице [1]. В расчетах далее принимаем $c_3 = 1550$ Дж/(кг·К).

С другой стороны, количество тепловой энергии Q_n за любой промежуток времени через единицу поверхности определяется уравнением теплопроводности [1]:

$$Q_n = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \cdot (t_n - \theta'') \cdot (\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_1}) \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right), \quad (3)$$

где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К). На теплопроводность среды (зерна) влияют различные факторы: способ подведения тепла, пористость насыпи, влажность материала и др. Поэтому допускается введение эквивалентной теплопроводности $\lambda_3 = 0,16$ Вт/(м·К) [1];

ρ - плотность зерна, кг/м³;

t_n - постоянная температура стенки шнека, К;

θ'' - средняя температура зерна, К;

τ_1, τ_2 - начальное и конечное время взаимодействия среды (зерна) с обогреваемой поверхностью, с.

Таким образом, для соблюдения теплового баланса шнекового подогрева зерна необходимо равенство величин $Q_{н.з.}$ и Q_n , распределенной по поверхности обогреваемого пути прохождения зерна. То есть, исходя из технологических параметров существующего обогрева зерна, требуется определить основные показатели при наличии шнекового обогрева и без него, а также определить количество подогреваемых шнеков электрообогревателями МКЭ-2 при заданных производительности процесса и температуре зерна на входе в норию без использования аппаратов БПЗ (рисунки 1).

2. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ПРИ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ОБОГРЕВЕ ШНЕКОВ

По формуле (2) рассчитаем производительность шнека $G_{ш}'$:

$$G_{ш}' = \frac{\pi \cdot 0,2^2 (\text{м}^2)}{4} \cdot 160 \text{ мин}^{-1} \cdot 60 \cdot 0,2 \text{ м} \cdot 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,3 = 14,47 \text{ т/ч} = 4,02 \text{ кг/с}$$

Учитывая, что при объемном обогреве на основе МКЭ происходит концентрация тепла вовнутрь обогревателя и $\lambda_{\text{мат.шнека}} \gg \lambda_{\text{резинны}}$ [4,12], принимаем допущение, что электрическая мощность электрообогревателей равна тепловой мощности, затрачиваемой на подогрев зерна. В этом случае для расчета величин прироста температур $\Delta\theta'$ и $\Delta\theta''$ по формулам (1) и (3) тепловые мощности $Q_{н.з.}$ и Q_n приравниваем к общей электрической мощности электрообогревателей, которая составляет $P_3 = P_3' + P_3'' = 1,5 \text{ кВт} + 2,1 \text{ кВт} = 3,6 \text{ кВт}$, тогда:

$$\Delta\theta' = \frac{Q_{н.з.}}{G_{ш}' \cdot c_3} = \frac{3600 \text{ Вт}}{4,02 \text{ кг/с} \cdot 1550 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{К}}} = 0,58 \text{ К}$$

Для расчета дополнительного обогрева по формуле (3), в которой время τ_1 примем за «0», а τ_2 рассчитаем по формуле (4):

$$\tau_2 = \frac{L}{t \cdot n}, \quad (4)$$

где L - длина шнеков, м;

n - угловая скорость шнеков, мин⁻¹;

t - шаг шнека, м; и ее величина составляет:

$$\tau_2 = \frac{10 \text{ м}}{0,3 \text{ м} \cdot 160 \text{ мин}^{-1}} = 0,208 \text{ мин} = 12,5 \text{ с.}$$

Тогда $\Delta\theta'' = (t_n - \theta'')$ найдем из формулы (3) по формуле (5):

$$\Delta\theta'' = \frac{Q_n}{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \cdot (\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_1}) \cdot S_{ш}}, \quad (5)$$

где $S_{ш}$ - площадь обогрева шнеков, м².

$S_{ш}$ определим как сумму площадей поверхностей электрообогревателей МКЭ-1 и МКЭ-2, прилегающих к шнекам.

$$S_{МКЭ-1} = 0,200 \cdot 0,35 \cdot 48 = 1,29 \text{ (м}^2\text{)},$$

$$S_{МКЭ-2} = 3,14 \cdot 0,22 \cdot 0,3 \cdot 14 = 2,90 \text{ (м}^2\text{)},$$

$$S_{ш} \approx 4,2 \text{ м}^2.$$

При этом значение $\Delta\theta''$ составляет:

$$\Delta\theta'' = \frac{3600 \text{ Дж}}{\frac{2}{\sqrt{3,14}} \cdot \sqrt{0,116 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} \cdot 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 1550 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}} \cdot (\sqrt{12,5}) \cdot 4,2 \text{ м}^2} = 0,56 \text{ К}$$

Тогда удельная мощность поверхностно-распределительного обогрева составит: $p_{уд} = P_3/S_{ш} = 3,6/4,2 = 0,860 \text{ кВт/м}^2$.

Таким образом, результаты расчетов по формулам (1) и (3) практически мало различаются, что дает основание судить о корректности выбранной методики.

Выполним расчет шнекового обогрева без использования аппаратов БПЗ для следующих технологических параметров:

$$G_{ш}'' = 7 \text{ т/ч} = 1,9 \text{ кг/с}; D_{шн} = 0,5 \text{ м}; t_{шн} = 0,5 \text{ м}; K_{зан} = 0,2; \theta_0'' = -5^\circ\text{C}; \theta_1'' = +15^\circ\text{C}; \Delta\theta'' = 20 \text{ К.}$$

Из формулы (2) находим угловую скорость шнека n'' :

$$n'' = \frac{G_{ш}''}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 60 \cdot t \cdot \rho_{нас} \cdot K_{зан}} = \frac{7000 \text{ кг/ч}}{\frac{3,14 \cdot 0,25^2 (\text{м}^2)}{4} \cdot 60 \cdot 0,5 \text{ м} \cdot 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,2} = 7,43 \text{ мин}^{-1}$$

По формуле (1) определим мощность нагрева:

$$Q_{н.з.}'' = G_{ш}'' \cdot c_3 \cdot \Delta\theta'' = 1,9 \text{ кг/с} \cdot 1550 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 20 \text{ К} = 58,9 \text{ кВт}$$

Определим длину окружности шнека l , по которой размещены электрообогреватели:

$$l = \pi \cdot D \cdot 3/4 = 3.14 \cdot 0.5 \cdot 3/4 = 1,18 \text{ м.}$$

$$\text{Площадь обогрева: } S_{об} = Q_{н.з.} / p_{уд.эл.} = 58,9/0,86 = 68,5 \text{ м}^2.$$

$$\text{Требуемая длина шнеков: } L = S_{об} / l = 68,5/1,18 = 58,0 \text{ м.}$$

Необходимое время прохождения зерна по шнеку:

$$\tau = \frac{L}{t \cdot n} = \frac{58,0}{0,5 \cdot 7,43} = 15,61 \text{ мин.}$$

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВА ЗЕРНА

Для подтверждения правильности выполненных теоретических расчетов необходимо провести

экспериментальные исследования и установить температурный градиент подогрева зерна при существовавшей системе и при наличии обогреваемых шнеков, а также определить максимальную производительность при комбинированном обогреве. Исследования проводились по специально разработанной и утвержденной программе и включали три независимых эксперимента по технологической схеме, представленной на рисунке, применительно к ЗАО «Союзмука» (г. Барнаул).

Измерения температуры проведены с помощью пирометра FSI (Германия), модель TPT62, на указанных участках технологической схемы: по поверхности бункеров 1 – датчики 7(№1) и 8(№2), на входе в норию 5 – датчик 10(№3).

Таблица 2 Определение градиента подогрева зерна при отключенном обогреве шнеков и включенных БПЗ

№ измерения	Время, мин	Значения температуры, °С		
		датчик №1	датчик №2	датчик №3
1	0	4,8	6,6	11,7
2	10	4,2	6,2	12,1
3	20	4,6	6,0	12,5
4	30	4,6	6,5	12,5
5	40	4,5	6,6	12,6
6	50	4,7	6,7	13,0
7	60	5,9	7,1	13,4
8	70	4,9	7,4	13,3

Таблица 3 Определение градиента подогрева зерна при включенном обогреве шнеков и включенных БПЗ

№ измерения	Время, мин	Значения температуры, °С		
		датчик №1	датчик №2	датчик №3
1	0	5,1	4,5	10,6
2	10	4,3	4,2	10,5
3	20	4,2	4,0	10,6
4	30	9,3	6,0	11,0
5	40	10,5	7,1	11,2
6	50	8,1	6,0	10,8
7	60	4,8	4,5	10,6

Экспериментально установлена погрешность измерения температуры зерна в месте подключения датчика №3, она составляет 1°С в сторону уменьшения. Температура наружного воздуха: -18°С, внутри помещения: +16°С.

На 21 минуте произошел останов БПЗ из-за срабатывания автоматики от снижения оборотов вращения привода. На 25 мин подняли частоту и включили систему.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Замеры температуры в местах расположения датчиков №1 и №2 были проведены пирометром по корпусам бункеров и отличаются приблизительно на 3÷3,5°С в сторону завышения от реальной температуры поступающего со

склада зерна. Это обстоятельство необходимо учесть в определении градиента температуры при работе системы подогрева зерна.

2. Максимальный нагрев зерна при работе только аппаратов БПЗ составляет 9÷9,5°С, а при совместном включении БПЗ и обогреве шнеков 10÷10,5°С, то есть превышение температуры составило 1÷1,5°С.
3. Установлено, что показания датчика 9 и датчика 10 (№3) (рисунок) при отключенных МКЭ практически одинаковы, либо датчиком 10 (№3) фиксируется температура на 1 °С меньше в сравнении с датчиком 9. При включенных МКЭ показания датчика 10 (№3) устойчиво превышают показания датчика 9 на 0,5÷1°С.

Таблица 4 Определение градиента подогрева зерна при включенном обогреве шнеков, включенных БПЗ и регулировании частоты привода.

№ измерения	Время, мин	Частота привода, Гц	Значения температуры, °С		
			датчик №1	датчик №2	датчик №3
1	0	50,0	6,8	5,7	11,7
2	5	45,0	6,4	6,1	12,0
3	10	40,0	6,0	5,8	12,5
4	15	40,0	6,6	6,2	12,7
5	20	35,0	7,0	6,0	14,2
6	25	50,0	9,3	7,2	16,5
7	30	50,0	9,0	6,8	14,7
8	35	50,0	8,2	6,6	13,5
9	40	50,0	8,0	6,8	12,7
10	50	50,0	6,1	5,7	12,5
11	60	50,0	5,2	5,0	12,5

Установлено, что производительность шнеков составляет около 15 т/ч при угловой скорости 160 мин⁻¹, и за счет значительной линейной скорости транспортировки и аспирации зерно в шнеке 4 несколько охлаждается (до 1°С).

4. При частотном регулировании и снижении производительности до 8÷9 т/ч (f=40 Гц, n=120 мин⁻¹) установлено, что градиент температуры, фиксируемой датчиком №3, увеличивается на 2÷3°С.

Таким образом, использование двух аппаратов БПЗ не обеспечивает подогрев зерна на ΔT = 20°С при заданной производительности шнеков 15 т/ч, а

использование дополнительного шнекового обогрева за счет электрообогревателей МКЭ-1 и МКЭ-2, установленной мощностью 3,6 кВт, при действующей технологии подогрева зерна, дает прирост температуры до 1÷1,5°С, что подтверждается теоретическими расчетами и экспериментальными исследованиями. Для обеспечения необходимой разности температур ΔT требуется увеличить длину шнеков до 58 м при снижении производительности до 7÷8 т/ч.

-
- [1]. Соколов А. Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна – М.: Колос, 1975. – 496с.
- [2]. Евстигнеев В.В. Расчет и проектирование низкотемпературных электрообогревателей / Евстигнеев В.В., Пугачев Г.А., Халина Т.М. Халин М.В. – Новосибирск: Наука, 2001. – 168с.
- [3]. Патент РФ №2055446, кл. Н 05 В 3/34. Гибкий композиционный электрообогреватель/ Халин М. В., Халина Т. М, Автономов И. В. - №93006711 /07. Заявл. 03.02.93; Оpubл. 27.02.96. Бюл. №6.
- [4]. Патент РФ №2191486, кл. Н 05 В 3/26. Композиционный гибкий электрообогреватель/ Халина Т. М., Тарабанов В. Л., Морозов С. П. - №2000119991/09. Заявл. 26.07.2000; Оpubл. 20.10.2003г. Бюл. №29.
- [5]. Технические условия ТУ 3468-007-02067824-2003. Многоэлектродные композиционные электрообогреватели МКЭ/ Разработчик Халина Т. М. – Барнаул, 2003 – 24с.