

Библиографический список

1. Патент RU 82984. Сошник / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин, И.В. Бирюков; Опубл. 20.05.2009 г. Бюл. № 14.
2. Патент RU 82985. Сошник / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин, И.В. Бирюков; Опубл. 20.05.2009 г. Бюл. № 14.
3. Патент RU 84663. Сошник / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин, И.В. Бирюков; Опубл. 20.07.2009 г. Бюл. № 20.
4. Патент RU № 2399189. Сошник / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин, И.В. Бирюков; Опубл.

20.09.2010 г. Бюл. № 26.

5. Патент RU № 2408180. Сошник / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин, И.В. Бирюков; Опубл. 10.01.2011 г. Бюл. № 1.
6. Патент RU № 100872. Комбинированный сошник / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин, И.В. Бирюков; Опубл. 10.01.2011 г. Бюл. № 1.
7. Гребневая технология и комплекс машин для возделывания кукурузы на силос / Н.С. Кабаков, В.М. Балашов, В.И. Таратоненко и др. - М.: ВИМ, 1990. – 28 с.

УДК 631:362.7

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ КОНТАКТНОГО СПОСОБА ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОТЫ ПРИ СУШКЕ ЗЕРНА

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и энергетика»

Павлушин Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и энергетика»;

ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия»

432063, г. Ульяновск, Бульвар Новый Венец, 1

Тел.89084788926; E-mail: andrejpavlu@yandex.ru

Ключевые слова: теория эксперимента, тепловая обработка, контактный способ передачи теплоты, режимные параметры процесса сушки, поверхности отклика, уровни варьирования.

Рассмотрена возможность использования контактного способа передачи теплоты при сушке зерна. Выявлены пути реализации данного способа передачи теплоты. Предложена установка контактного типа для сушки зерна. Приведены основные теоретические зависимости по определению режимных параметров процесса сушки зерна. Описана методика исследований процесса сушки зерна в предложенной установке и представлены результаты экспериментов.

Возможность использования контактного нагрева для сушки зерна подтверждена рядом исследований [2]. 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 [3]. При использовании высокопроизводительных установок контактная сушка в чистом виде не эффективна. Однако при переработке небольших партий зерна ее можно использовать гораздо шире и на более высоком энергетическом уровне.

Нами предложена установка контактного типа для сушки зерна (рис. 1), которая

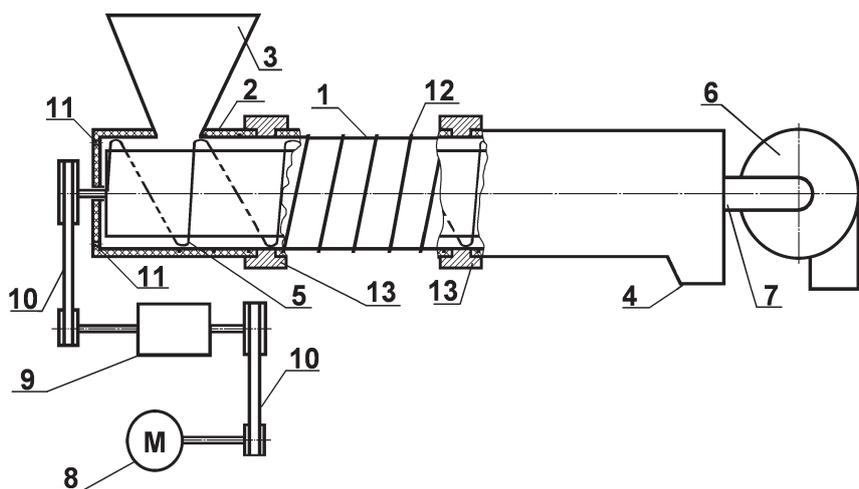


Рис. 1. Установка для тепловой обработки зерна (обозначения в тексте)

состоит из цилиндрического составного кожуха 1, покрытого слоем теплоизолирующего материала 2, загрузочного бункера 3, выгрузного окна 4, соосно установленного внутри кожуха с возможностью вращения транспортирующего рабочего органа 5, выполненного в виде шнека с перфорированными витками, а также охлаждающего устройства, включающего вентилятор 6 и воздуховод 7, соединённый с внутренней полостью кожуха 1 за выгрузным окном 4 [4, 5].

Транспортирующий рабочий орган 5 получает привод от электродвигателя 8 через вариатор 9 посредством передачи 10. Торцевая поверхность кожуха 1 со стороны загрузочного бункера 3 выполнена с отверстиями 11. На внешней поверхности кожуха 1 под слоем теплоизолирующего материала 2 между загрузочным бункером 3 и выгрузным окном 4 размещены нагревательные элементы 12. Составные части кожуха 1 разделены между собой кольцами 13, причем отдельным нагревательным элементом 12 снабжена каждая из частей кожуха 1.

Теоретическое исследование имело цель установить количественные и качественные связи между параметрами, изменяющимися в процессе тепловой обработки и параметрами разрабатываемой установки.

Температуру и влагосодержание высушиваемого зерна определяют по процессам подвода и отвода теплоты и влаги с поверх-

ности зерна в окружающую среду. При этом для определения времени сушки необходимо решить систему дифференциальных уравнений массо- и теплопереноса при соответствующих граничных условиях. Согласно закону сохранения энергии, вся теплота, подведенная к зерну, затрачивается на испарение влаги, нагрев зерна и некоторых элементов установки.

Количество теплоты, Дж/с, затрачиваемое на испарение влаги,

$$Q_{\text{исп}} = r \frac{dm_{\text{в}}}{dt} = r \frac{m_{\text{вл}} d\omega}{100 dt}$$

где r – удельная теплота испарения влаги, Дж/кг; $m_{\text{в}}$ – масса влаги, содержащейся во влажном зерне, кг; t – экспозиция сушки, с; $m_{\text{вл}}$ – масса влажного зерна, кг; $\omega = 100m_{\text{в}}/m_{\text{вл}}$ – влажность зерна, %; ρ – насыпная плотность влажного зерна, кг/м³; V – объем, занимаемый влажным зерном, м³.

Количество теплоты, Дж/с, необходимое для нагревания зерна,

$$Q_{\text{наг}} = c_{\text{вл}} m_{\text{вл}} \frac{dt}{dt},$$

где $c_{\text{вл}} = c_0 (1 - x) + c_{\text{в}} x$ – теплоемкость влажного зерна, Дж/(кг•К); $c_0, c_{\text{в}}$ – удельные теплоемкости соответственно абсолютно сухого зерна и влаги, Дж/(кг•К); x – массовая доля влаги в зерне, t – температура греющей поверхности установки, °С.

Количество теплоты, Дж/с, затрачиваемое на нагрев элементов установки,

$$Q_{\text{уст}} = c_{\text{уст}} m_{\text{уст}} \frac{dt}{dt},$$

где $c_{\text{см}}$ – суммарная теплоемкость материалов элементов установки, Дж/(кг•К); $m_{\text{см}}$ – масса нагреваемых элементов установки, кг.

Суммарное количество теплоты, Дж/с, затраченное на нагрев элементов установки, зерна и испарение влаги из него, равно количеству подведенной теплоты в единицу

времени от поверхности нагрева:

$$Q_{\text{сумм}} = K \Delta t F$$

где K - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²•К); Δt - температурный градиент, К; F - площадь греющей поверхности, м².

При вычислениях принимаем, что контакт зерна с греющей поверхностью осуществляется по всей ее площади F .

Масса влаги, удаляемой из зерна в единицу времени, кг/с,

$$j = \frac{dC}{d\tau} V$$

где C - объемная концентрация влаги в зерне, кг/м³.

Масса влаги, удаляемой со свободной поверхности зерна, кг/с,

$$j_{\text{сп}} = \beta(C - C_p)S$$

где β - коэффициент массопередачи, м/с; C_p - равновесная концентрация влаги в зерне, кг/м³; S - площадь свободной поверхности испарения, м².

Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{тепл}}} + \sum r_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_m}}$$

где $\alpha_{\text{тепл}}$ и α_m - соответственно коэффициенты теплоотдачи для теплоносителя и влажного материала, Вт/(м²•К); $\sum r_{\text{ст}}$ - сумма термических сопротивлений, м²•К/Вт.

На основе решения задачи о кратковременном контакте без учета массопереноса коэффициент теплопередачи между греющей поверхностью и зерном можно определить по формуле [1]:

$$\alpha_m = \frac{2\sqrt{\lambda c_{\text{вл}} \rho}}{\sqrt{\pi} \sqrt{\tau_{\text{ср}}}}$$

где λ - коэффициент теплопроводности влажного материала, Вт/(м•К); α_m - средний коэффициент теплоотдачи за время τ от начала контакта зерна с греющей поверхностью, Вт/(м²•К).

В исследуемой горизонтальной установке для сушки зерна величина $\tau_{\text{ср}}$ представляет собой промежуток времени между двумя последовательными прохождениями точки, расположенной на наружной поверхности витка шнека, через данную точку гре-

ющей поверхности.

В конечном итоге, после проведенных преобразований, система уравнений, описывающих процесс контактной сушки зерна в предлагаемой установке, может быть сведена к следующему виду:

$$\frac{dt}{d\tau} + \frac{r}{100(c_{\text{вл}} + \frac{c_{\text{уст}} m_{\text{уст}}}{m_{\text{вл}}})} \frac{dW}{d\tau} = \frac{\frac{F}{m_{\text{вл}}} \Delta t_{\text{ср}} \frac{1}{c_{\text{вл}} + \frac{c_{\text{уст}} m_{\text{уст}}}{m_{\text{вл}}}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{тепл}}} + \sum r_{\text{ст}} + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\lambda c_{\text{вл}} \rho}} \sqrt{\tau_{\text{ср}}}}$$

$$\frac{dW}{d\tau} = \beta R(W - W_p)$$

где W , W_p - соответственно влажность материала и равновесная влажность материала, %.

Целью экспериментальных исследований являлось определение оптимальных режимных параметров предложенного устройства для сушки зерна, предназначенного для применения в условиях небольших зерноперерабатывающих и фермерских хозяйств. Материалом для исследования служило зерно пшеницы сорта «Кинельская Л 503».

Исследования влияния исходной влажности зерна на влагосъем и, как следствие, на удельные затраты энергии на сушку, показали, что с увеличением исходной влажности влагосъем снижается, причём зависимость имеет вид полиномиальной кривой (рисунок 2), которая описывается уравнением:

$$Y = 40,2068 - 4,2648x - 0,0651x^2$$

где Y - исходная влажность зерна, %; x - разовый влагосъем, %.

Корреляционное отношение R для данного уравнения равно 0,958.

Снижение влагосъёма при увеличении исходной влажности объясняется тем, что одинаковые объёмы зерна при разной исходной влажности имеют различную массу. Это связано с тем, что в зерне с большей исходной влажностью содержится и больше влаги, на испарение которой требуется затратить дополнительное количество энергии. Так как исследования по влиянию исходной влажности на влагосъем проводили на одинаковых режимах, то зерно с большей исходной влажностью не успевало прогреваться за одинаковое время опы-

Уровни варьирования независимых факторов

Уровни варьирования	Варьируемые факторы		
	Средняя температура греющей поверхности t , °С	скорость движения зерна v_3 , м/с	скорость движения воздуха $v_в$, м/с
верхний (+1)	70	0,034	7,6
основной (0)	60	0,0205	3,8
нижний (-1)	50	0,007	0
интервал варьирования, Δx_i	10	0,0135	3,8

та, следовательно, в этом случае получали меньший влагосъём. Напротив, зерно с низкой исходной влажностью (и меньшей массой) эффективнее нагревалось, и влагосъём в этом случае возрастал.

Априорное исследование факторов, влияющих на исходные параметры процесса сушки, позволило выделить три управляемых фактора: среднюю температуру греющей поверхности t (x_1), скорость движения зерна v_3 (x_2), скорость движения воздуха $v_в$ (x_3).

На основании ранее выполненных исследований процесса сушки, результатов поисковых опытов, а также исходя из конструктивных соображений, нами приняты пределы варьирования основных независимых факторов процесса сушки (таб. 1).

В качестве критерия оптимизации нами были приняты удельные затраты теплоты на 1 кг испаренной влаги q , кДж/кг.

После обработки результатов проведённых опытов по сушке зерна пшеницы, в случае, когда направление движение воздуха совпадало с направлением движения зерна в установке (прямоток), было получено следующее уравнение регрессии в кодированных значениях факторов для случая, когда $x_1 = 0$ (средняя температура греющей поверхности):

$$Y = 3103,89 + 88,51x_2 + 69,93x_3 - 234,91x_2^2 + 39,51x_2x_3 + 158,47x_3^2, \quad (1)$$

где Y - удельные затраты энергии на испарение влаги, кДж/кг; x_2 - скорость движения воздуха; x_3 - средняя температура греющей поверхности.

Проведём анализ полученного уравнения с закодированными величинами фак-

торов. При этом в полученной математической модели определим центр поверхности отклика, для чего найдем частные производные по каждому фактору, и приравняем полученные выражения нулю. После этого проведем каноническое преобразование моделей второго порядка и выполним графоаналитический анализ полученных выражений. На графике в координатах независимых переменных с натуральным масштабом нанесем центр (точку S) поверхностей отклика, и из него проведем координатные оси главных направлений канонических уравнений. После этого, придавая различные значения критерию оптимизации в канонических уравнениях, построим серии кривых равного выхода (изолиний) в области допустимых значений варьирования независимых переменных. По кривым сечений можно судить об изменении величины критерия оптимизации в зависимости от значений независимых факторов.

Так, для нашего случая после преобразований и необходимых расчётов получаем следующий вид двухмерного сечения (рис. 3).

Рисунок показывает, что удельные затраты энергии в точке S (локальный минимум) $Y_s = 3102,8$ кДж/(кг влаги) достигаются при скорости движения воздуха 5,4 м/с и средней температуре греющей поверхности 57,6 °С.

Аналогично был проведён анализ математических моделей, полученных при варьировании уровней каждой пары факторов ($x_1 - x_2$; $x_1 - x_3$).

В результате анализа полученных результатов выявлено, что удельные затраты теплоты на испарение из зерна пшеницы влаги при прямотоке снижаются до $q_{\min} =$

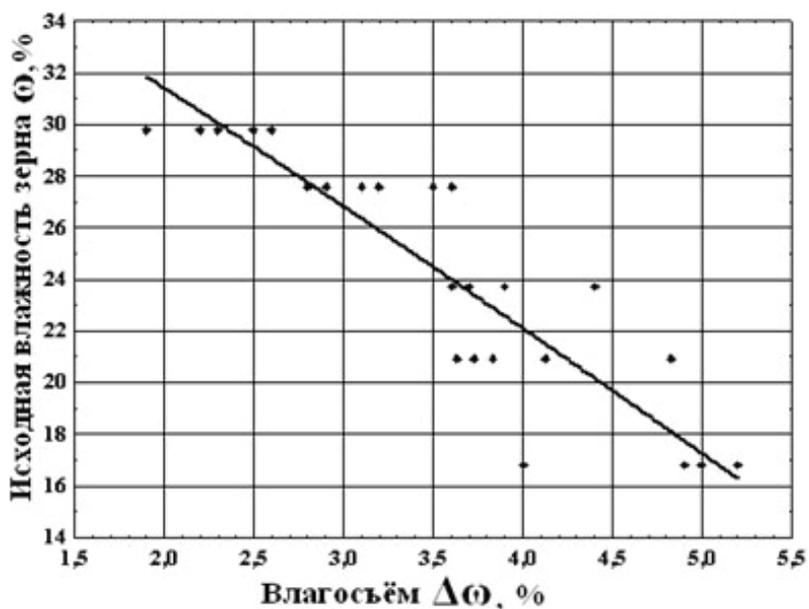


Рис. 2. Зависимость влагосъёма от исходной влажности зерна

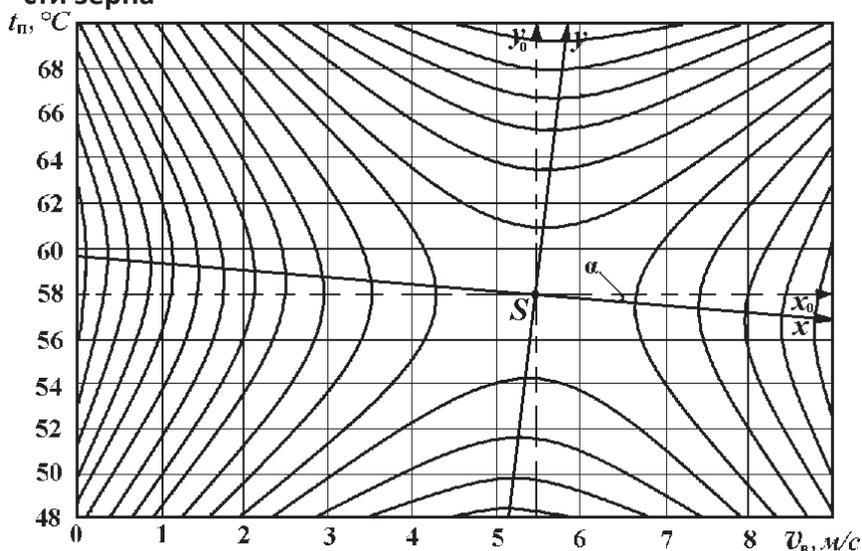


Рис. 3. Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей удельные затраты теплоты на испарение влаги, кДж/кг

3042 кДж/кг при скорости движения зерна $v_{з\text{ опт}} = 0,0035$ м/с и средней температуре поверхности кожуа $t_{п\text{ опт}} = 61,8$ °С. Однако полученный минимум энергозатрат соответствует неприемлемым режимам процесса, так как при $v_{з\text{ опт}} = 0,0035$ м/с пропускная способность установки не превышает 90 кг/ч, что экономически нецелесообразно. Поэтому рациональными удельными затратами теплоты будем считать такие, при которых пропускная способность установки максимальна, а разовый влагосъём - не менее 2%. Это условие выполняется при $v_з$

$= 0,033$ м/с и средней температуре греющей поверхности $t_{п\text{ рац}} = 58$ °С. При этих режимных параметрах удельные затраты теплоты на испарение из зерна пшеницы влаги $q_{\text{рац}} = 3102,8$ кДж/кг при пропускной способности установки 250 кг/ч.

Таким образом, в результате теоретических исследований были установлены зависимости скорости сушки от входных параметров зерна (температуры, влажности) и параметров установки (температуры и площади греющей поверхности), на основании которых с помощью экспериментальных исследований определены рациональные режимные параметры процесса сушки зерна пшеницы.

Проведённые эксперименты показали эффективность предложенной установки контактного типа при сушке зерна пшеницы. Удельные затраты энергии на испарение влаги у предлагаемой установки оказались на 1,7 МДж/кг меньше по сравнению с серийно выпускаемой установкой СЗПБ-2,5.

Библиографический список

1. Кришер О. Научные основы техники сушки. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 539 с.
2. Лыков А.В. Теория переноса энергии и вещества / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Минск: Изд-во Акад. Наук БССР, 1954. – 357с.
3. Малин Н.И. Справочник по сушке зерна. – М.: Агропромиздат, 1987. – 316с.
4. Патент РФ № 2323580. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; Опубл. 10.05.2008 г. Бюл. № 13.
5. Патент РФ № 2371650. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.Н. Зозуля; Опубл. 27.10.2009 г. Бюл. № 30.