

5. Курдюмов, В.И. Энергосберегающие средства механизации гребневого возделывания пропашных культур / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2013. – № 1(21). – С.144-149.

6. Курдюмов, В.И. К обоснованию угла атаки плоского диска рабочего органа гребневой сеялки / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2012. – № 4 (20). – С. 127 - 130.

7. Курдюмов, В.И. Исследование катка-гребнеобразователя в лабораторных условиях / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2009. – № 2 (9). – С. 91 - 95.

8. Экспериментальные исследования универсального катка-гребнеобразователя / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин, И.А. Шаронов, В.П. Зайцев // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2011. – № 4 (16). – С. 107 - 112.

УДК 631:362.7

ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В ЗЕРНОСУШИЛКЕ КОНТАКТНОГО ТИПА

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»

Карпенко Галина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и энергетика»

ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина»

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1; тел.: 89084788926;

e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.

Ключевые слова: тепловой режим зерносушилки, сушка зерна, экспозиция сушки, контактный теплоподвод.

Рассмотрены теоретические особенности контактного теплоподвода. Определены условия передачи теплоты зерну от греющей поверхности при выполнении её в форме цилиндра. Обоснован механизм распределения температуры в тепловой камере установки для тепловой обработки зерна. Выявлены оптимальные значения режимных параметров разработанной установки при сушке семян подсолнечника.

Введение

Одним из наиболее необходимых и энергоёмких видов теплового воздействия на зерно в аграрном производстве является его послеуборочная сушка. В результате этого вида теплового воздействия зерновые продукты значительно улучшают своё качество, повышается их стойкость при хранении или временной консервации.

Сушка зерна является не только теплофизическим, но и технологическим процессом, причём в физической природе протека-

ния этого процесса определяющее значение имеет форма связи влаги с объектом теплового воздействия - зерном.

Основой теории теплового воздействия на зерно при контактном способе передачи теплоты служат закономерности передачи теплоты от греющей поверхности к обрабатываемому зерну.

Цель настоящих исследований – обоснование режимов сушки семян подсолнечника.

Объекты и методы исследований

Для достижения поставленной цели применяли дифференциальное и интегральное исчисления; численные методы; методы математической статистики, корреляционно-регрессионного анализа. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментальной проверкой в лабораторных и условиях. Достоверность полученных данных обеспечена применением методов математической обработки и статистического анализа результатов исследований, многофакторного анализа, лицензионных математических программных пакетов для ПЭВМ: «Statistica-10», «MathCAD-14», «Derive-6» и «Microsoft Office Excel 2010».

При контактном способе передачи теплоты энергия подводится к обрабатываемому зерну от греющей поверхности установки посредством теплопроводности.

Энергетический баланс для элементарного объёма зерна, подвергаемого тепловому воздействию в установке для тепловой обработки зерна (УТОЗ) может быть представлен в виде [1, 3]:

$$c\rho \frac{\partial t_{zn}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t_{zn}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t_{zn}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t_{zn}}{\partial z} \right) + q, \quad (1)$$

где c - удельная теплоёмкость материала греющей поверхности, кДж/(кг·°C); ρ - теплота парообразования, кДж/кг; t_{zn} - температура греющей поверхности, °C; τ - экспозиция теплового воздействия, с; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);

$q = c\rho dx dy dz \frac{\partial t}{\partial \tau}$ - количество теплоты, передаваемое от греющей поверхности к единичному объёму зернового материала, кДж.

При этом систему дифференциальных уравнений передачи теплоты можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial t_{zn}(\xi, x)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 t_{zn}(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} + \frac{\Gamma}{\xi} \frac{\partial t(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right] + \frac{\varepsilon \rho \partial \theta(\xi, \tau)}{\partial \tau},$$

$$\frac{\partial \theta(\xi, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 \theta(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} + \frac{\Gamma}{\xi} \frac{\partial \theta(\xi, \tau)}{\partial \xi} \right], \quad (2)$$

$$t(\xi, 0) = f(\xi), \quad (3)$$

$$t(\xi, 0) = f(\xi), \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad t_{zn}(0, \tau) < \infty \\ \frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad \theta(0, \tau) < \infty \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где a - коэффициент температуропроводности, м²/с; Γ - фактор формы греющей поверхности: для горизонтальной пластины $\Gamma=0$, для цилиндра $\Gamma=0$; ε - критерий фазового перехода; ξ - глубина зоны испарения, м; $\theta = [t_{(0, \tau)} - t_{zn}]$ - разность между переменной температурой обрабатываемого зерна $t_{(0, \tau)}$ и постоянной температурой греющей поверхности t_{zn} , °C.

Выявим условия передачи теплоты зерну от греющей поверхности УТОЗ при выполнении греющей поверхности в форме цилиндра (рис. 1).

В рассматриваемом примере теплота q_0 от нагревательных элементов, располо-

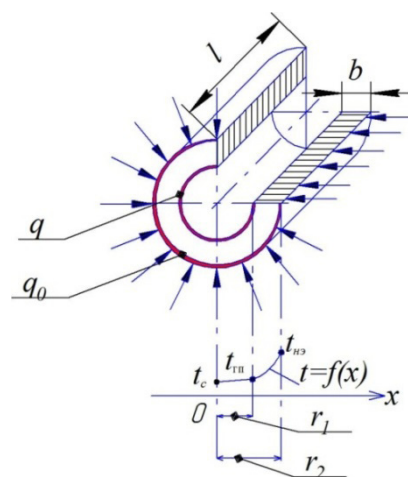


Рис. 1 – К обоснованию передачи теплоты зерну от цилиндрической греющей поверхности:

l - длина цилиндра, м; b - толщина цилиндра, м; r_1 - радиус внутренней поверхности цилиндра, м; r_2 - радиус наружной поверхности цилиндра, м; $t_{нэ}$ - температура нагревательного элемента (внешней поверхности цилиндра), °C; t_{zn} - температура греющей поверхности (внутренней поверхности цилиндра), °C; t_c - температура воздуха в сушильной камере, °C; q_0 - количество теплоты, подводимое к греющей поверхности от нагревательного элемента, кДж



Рис. 2 – УТОЗ при проведении лабораторных исследований:

1 – рама; 2 – кожух 3 – бункер загрузочный; 4 – лоток выгрузной; 5 – заслонка; 6 – шибер; 7 – вентилятор; 8 – выпрямитель тока; 9 – электродвигатель; 10 – редуктор; 11 – воздуховод; 12 – комплект измерительных приборов; 13 – теплообменник

женных на внешней поверхности цилиндра, передаётся посредством теплопроводности через стенку цилиндра к его внутренней поверхности. Зерно в процессе тепловой обработки контактирует с внутренней поверхностью цилиндра (греющей поверхностью) и также нагревается. Кроме того, от поступающей в сушильную камеру теплоты происходит нагрев винтового транспортирующего рабочего органа (шнека), расположенного в ней (на схеме не указан). В процессе теплового воздействия шнек также нагревается и начинает выполнять функцию источника теплоты. Зерно, расположенное в зазоре между внутренней поверхностью цилиндра и внешней поверхностью вала шнека, равномерно нагревается.

Для упрощения обоснования процесса теплопередачи ограничимся подводом теплоты к обрабатываемому зерну только от греющей поверхности (внутренней поверхности цилиндра).

Тогда распределение температуры в тепловой камере УТОЗ, как функцию от радиуса цилиндрической греющей поверхности и времени теплового воздействия (экспозиции), при качественной теплоизоляции внешней поверхности цилиндра, т.е. $\frac{\partial t(r_2, \tau)}{\partial x} = 0$, можно представить в виде:

$$t(x, \tau) - t_0 = \frac{q}{\lambda} r_2 \left\{ \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left[2Fo - 0,25 \left(1 - 2 \frac{r_2^2}{r_1^2} \right) - \frac{r_1^2}{r_2^2} \left(\ln \frac{r}{r_1} + \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{3}{4} \right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \frac{J_1 \left(\mu_n \frac{r_1}{r_2} \right) J_1(\mu_n)}{J_1^2 \left(\mu_n \frac{r_1}{r_2} \right) - J_1^2(\mu_n)} \left[J_0 \left(\mu_n \frac{x}{r_2} \right) Y_1 \left(\mu_n \frac{r_1}{r_2} \right) - Y_0 \left(\mu_n \frac{x}{r_2} \right) J_1 \left(\mu_n \frac{r_1}{r_2} \right) \right] \exp(-\mu_n^2 Fo) \right\}, \quad (6)$$

где $Fo = \frac{a\tau}{r_2^2}$ – критерий Фурье;

$\mu_n = p_n r_2$ – корни характеристического уравнения; J_1 и J_0 – функции Струве первого и нулевого порядков; Y_1 и Y_0 – функции Бесселя второго рода первого и нулевого порядков.

Следовательно, процесс передачи теплоты зерну в зерносушилках контактного типа зависит от параметров греющей поверхности, а также от скорости изменения температурного поля, физических характеристик и размеров высушиваемого зерна.

Кроме того, качественная теплоизоляция внешней части греющей поверхности и выполнение её из материалов, характеризующихся высокими значениями коэффициента теплопроводности (алюминий, медь и т.п.), позволяет на практике достигнуть высокой энергоэффективности процесса теплового воздействия (максимальное количество подводимой теплоты будет затрачиваться на нагрев зерна, испарение из него влаги и удаление её из тепловой камеры).

Результаты исследований

Для подтверждения теоретических аспектов об эффективности использования контактного способа подвода теплоты при сушке зерна и выявления оптимальных тепловых режимов процесса нами была разработана и исследована установка контактного типа для тепловой обработки зерна [4...14] (рис. 2).

В ходе проведения исследований при сушке зерна подсолнечника сорта «Поволжский-60» нами были получены необходимые данные для составления математических моделей указанного процесса в разработанной установке.

Уравнение регрессии, характеризующее

ющее влияние температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха на суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги из семян подсолнечника, имеет вид:

$$q = -19,4851 + 0,3543t - 0,0173v_g - 0,0014t^2 + 0,0085tv_g - 0,1343v_g^2, \quad (7)$$

где t – температура греющей поверхности, °С.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха и их совместного влияния на суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги из семян подсолнечника приведено на рисунке 3.

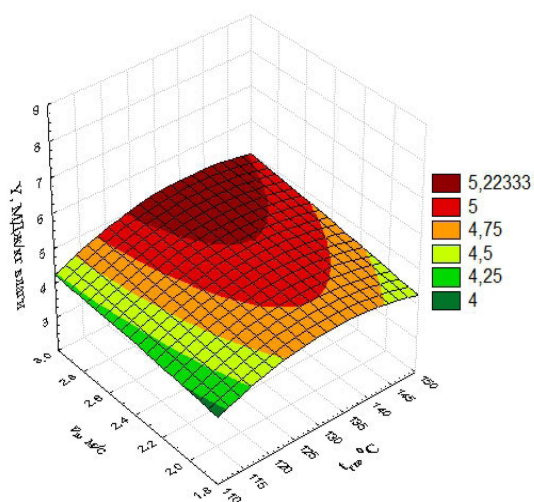


Рис. 3 – Графическая интерпретация уравнения 7

Зависимость суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги из семян подсолнечника от температуры греющей поверхности, скорости движения семян подсолнечника и их взаимодействия имеет вид:

$$q = -16,4708 + 0,4094t - 1916,0205v_s - 0,0014t^2 - 6,7019tv_s + 203640v_s^2. \quad (8)$$

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия температуры греющей поверхности и скорости движения семян подсолнечника, и их влияние на критерий оптимизации приведено на рисунке 4.

В таблице приведены результаты критериальной оценки полученных уравнений регрессий [2].

Сравнение полученных расчётных зна-

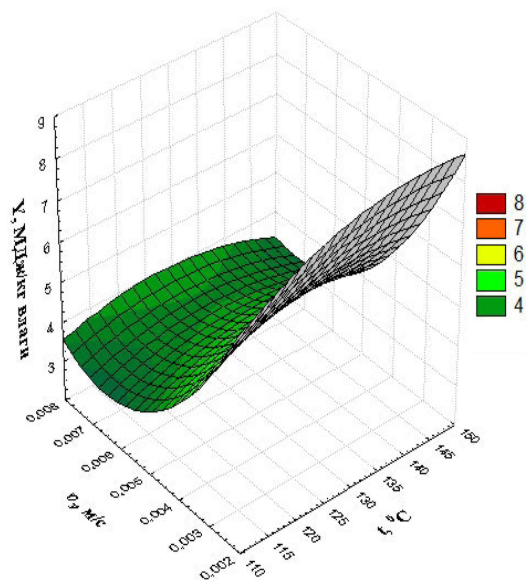


Рис. 4 – Графическая интерпретация уравнения 8

Таблица 1

Критериальная оценка уравнений регрессий

№ уравнения	Критерии*						
	R	F_p	F_T	t_p	t_T	G_p	G_T
7	0,947	2,31	2,4	7,28	2,004	0,0879	0,1131
8	0,941	2,05	2,4	4,92	2,004	0,0954	0,1131

* - в таблице принято: R – корреляционное отношение; F_p – расчётное значение критерия Фишера; F_m – табличное значение критерия Фишера; t_p – расчётное значение критерия Стьюдента; t_m – табличное значение критерия Стьюдента; G_p – расчётное значение критерия Кохрена, G_m – табличное значение критерия Кохрена.

чений критериев с их табличными значениями показало адекватность полученных математических моделей, значимость их коэффициентов и достоверность проведенных исследований.

Выводы

На основании интерпретации полученных моделей были выявлены оптимальные параметры теплового режима в исследуемой УТОЗ.

Так, оптимальная температура греющей поверхности УТОЗ составляет 130 °С. Указанная температура достигается при экспозиции сушки 184 с (соответствует скорости движения семян подсолнечника в УТОЗ 0,0068 м/с) и скорости движения воздуха в установке 2,83 м/с. Суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги из семян на полученных режимах минимальны и составляют 3,59 МДж/кг. Разовый влагосъём при этом находился в пределах 2,5...3,5 %.

Выявленные параметры теплового режима УТОЗ позволяют обеспечить качественную сушку семян подсолнечника без снижения их семенных свойств.

Библиографический список

1. Курдюмов, В.И. Повышение эффективности послеуборочной обработки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин // Доклады Россельхозакадемии. - 2011. - № 6. - С. 56-58.
2. Курдюмов, В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа // В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин: монография. – Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.
3. Курдюмов, В.И. Теоретические и экспериментальные аспекты контактного способа передачи теплоты при сушке зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2011. - № 3. - С. 106-110.
4. Патент 59226 РФ, МПК F26B17/20. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин. – Заявлено 19.04.2006; опубл. 10.12.2006 г. Бюл. № 34.
5. Патент 2323580 РФ, МПК A23B9/08. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин. – Заявлено 28.03.2006; опубл. 10.05.2008 г. Бюл. № 13.
6. Патент 2428642 РФ, МПК F26B11/16. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин. – Заявлено 14.04.2010; опубл. 10.09.2011 г. Бюл. № 25.
7. Патент 2371650 РФ, МПК F26B11/14. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.Н. Зозуля. – Заявлено 18.02.2008; опубл. 27.10.2009 г. Бюл. № 30.
8. Патент 90970 РФ, МПК A23B9/08. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин – Заявлено 07.10.2009; опубл. 27.01.2010 г. Бюл. № 3.
9. Патент 2436630 РФ, МПК B02B1/00. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин – Заявлено 31.05.2010; опубл. 20.12.2011 г. Бюл. № 35.
10. Патент 2465527 РФ, МПК F26B17/04. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин – Заявлено 13.05.2011; опубл. 27.10.2012 г. Бюл. № 30.
11. Патент 2428642 РФ, МПК F26B 11/16. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин – Заявлено 14.04.2010; опубл. 10.09.2011 г. Бюл. № 25.
12. Патент 2453123 РФ, A23B 9/08. Устройство для сушки пищевых продуктов. В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин – Заявлено 10.11.2010; опубл. 20.06.2012 г. Бюл. № 17.
13. Патент 96639 РФ, F26B 3/00. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.А. Постников – Заявлено 24.02.2010; опубл. 10.08.2010 г. Бюл. № 22.
14. Патент 119862 РФ, F26B 11/16. Устройство для сушки зерна. В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин – Заявлено 11.01.2012; опубл. 27.08.2012 г. Бюл. № 24.