

тивности процесса экструдирования зерна с обоснованием конструктивно-режимных параметров зоны подачи пресс-экструдера: дисс. ... канд. тех. наук / Н.А. Харьбина. – Уфа, 2011, – 167 с.

9. Обертышев, А.И. Исследование влияния загрузки и некоторых параметров загрузочных устройств на работу винтовых транспортёров сельскохозяйственного назначения: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.И. Обертышев. – Саратов, 1972. – 25 с.

10. Новиков, В.В. Исследование рабочего процесса и обоснование параметров пресс-экструдера для приготовления карбамидного концентрата: дисс. ... канд. техн. наук / В.В. Новиков. – Саратов: СИМСХ, 1981 – 157 с.

11. Коновалов В.В. Определение подачи цилиндрического шнекового пресса / В.В. Новиков, Д.В. Беляев, Л.В. Иноземцева // Нива Поволжья. – 2010. - № 2. – С. 51-57.

УДК 631:362.7

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ В ЗЕРНОСУШИЛКАХ 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, дом 1; тел.: 89050359200;

e-mail: [andrejpavlu@yandex.ru](mailto:andrejpavlu@yandex.ru).

**Ключевые слова:** сушка зерна, экспозиция сушки, контактный теплоподвод, удаление влаги из зерна.

Рассмотрены теоретические особенности контактного теплоподвода. Обоснован механизм распределения воздушных потоков в тепловой камере установок контактного типа для сушки зерна. Выявлены оптимальные значения параметров воздуха при сушке зерна в разработанных средствах механизации.

### Введение

Одним из наиболее необходимых и энергоёмких видов теплового воздействия на зерно в аграрном производстве является его послеуборочная сушка. В частности, только в России на этот процесс затрачивают более 700 тыс. т топлива [1]. При этом Правительством Российской Федерации принят ряд правовых актов, направленных на повышение энергоэффективности производства валового внутреннего продукта страны к 2020 г. не менее чем на 40 %.

Следовательно, научное обоснование,

разработка, апробация и внедрение в производство энергосберегающих зерносушилок является актуальной и важной научно-технической проблемой.

Решение указанной проблемы заключается в решении комплекса взаимосвязанных задач, к которым относят исследование и учёт свойств зерна, выбор способа подвода теплоты и обоснование оптимального, с точки зрения энергоэффективности и обеспечения требуемого качества готового продукта режима сушки, расчёты тепло-, влагопереноса и тепло-, влагообмена, обоснование конструкций

тепловых установок и т. п.

Основой теории сушки зерна при контактном способе подвода теплоты служат закономерности передачи теплоты от греющей поверхности к обрабатываемому зерну, при этом необходимо обосновать перенос теплоты и влаги в зерновке, а также особенности удаления влаги с поверхности зерна [2].

В общем случае механизм удаления влаги из зерна схематически может быть представлен следующим образом (рис. 1).

Тепловая энергия от греющей поверхности установки передаётся зерновке, при этом происходит удаление влаги из зерновки в тепловую камеру зерносушилки. Одновременно поверхность высушиваемого зерна омывает воздушный поток с заданными параметрами, с помощью которого испарившаяся влага удаляется из тепловой камеры. При этом появляются перепады влагосодержания, температуры и давления, вследствие чего влага из внутренних слоёв зерновки постоянно подводится к поверхности, и процесс испарения повторяется [3].

Выделяющийся пар проходит сквозь пограничный слой 2 (рис. 1) и адсорбируется воздушным потоком.

Зависимость перемещения влаги внутри высушиваемого зерна можно выразить следующим образом:

$$q_m = -(a_m \rho_0 \nabla u + a_m \rho_0 \nabla t + a_{mp} \nabla P) \quad (1)$$

где  $q_m$  - интенсивность испарения влаги, кг/(м<sup>2</sup>·ч);  $a_m$  - коэффициент влагообмена между поверхностью влажного зернового материала и окружающим воздухом, Вт/(м<sup>2</sup>·кг), зависящий главным образом от скорости и направления движения воздуха;  $\rho_0$  - удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;  $a_m$  - коэффициент термодиффузии, (°C)<sup>-1</sup>,  $\nabla u$  - градиент влагосодержания, кг/(кг сухого вещества·м);  $\nabla t$  - градиент температуры, °C/м;  $a_{mp}$  - коэффициент влагообмена, отнесённого к  $\nabla P$ , Вт/(м<sup>2</sup>·кг);  $\nabla P$  - градиент давления, Па/м.

Знак минус в уравнении 1 означает, что движение влаги направлено в сторону

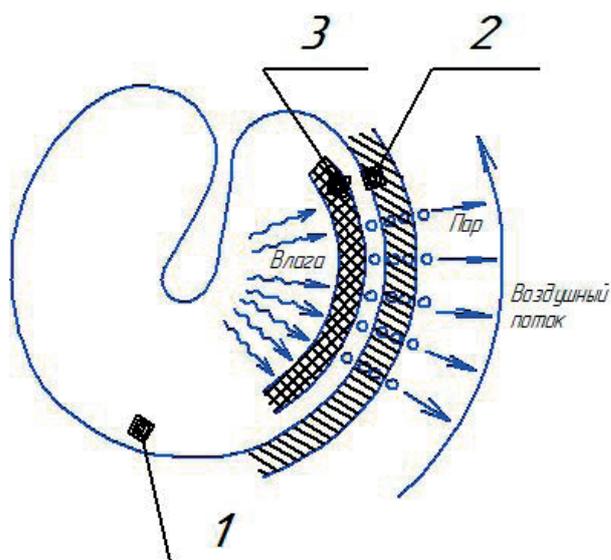


Рис. 1 - Механизм удаления влаги при воздействии на зерно теплоты:

1 - зерновка; 2 - пограничный слой; 3 - зона испарения

уменьшения влажности (от центра к поверхности зерновки).

Удаление влаги с поверхности зерна можно интерпретировать следующим образом.

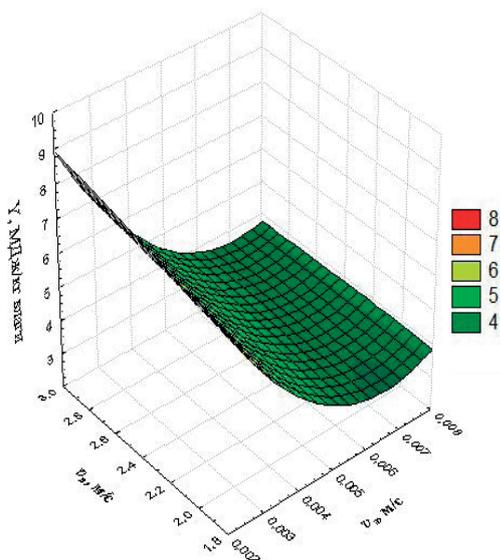
$$q_m = a_m (p_m - p_n) \frac{p_0}{P}, \quad (2)$$

где  $p_m$  и  $p_n$  - парциальные давления водяного пара соответственно у поверхности зернового материала и в окружающей среде (воздухе), Па;  $p_0$  - нормальное атмосферное давление, Па;  $P$  - фактическое атмосферное давление, Па.

Так как при контактном способе сушки температурный градиент незначителен, то влага внутри высушиваемого зерна перемещается благодаря теплопроводности:

$$kp_0 (\nabla u)_n S = a_m (p_m - p_n) \frac{p_0}{P} S = \frac{dm_{вл}}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $k$  - коэффициент теплопроводности зернового материала, м<sup>2</sup>/ч;  $S$  - площадь поверхности испарения, м<sup>2</sup>;  $(\nabla u)_n$  - градиент влагосодержания у поверхности высушиваемого зерна, кг/(кг сухого вещества·м);  $m_{вл}$  - масса испарённой влаги из зерна, кг;  $\tau$  - экспозиция сушки, с.



**Рис. 2 – Графическая интерпретация уравнения 4**

Уравнение (3) выражает в общем виде зависимость скорости контактной сушки от скорости перемещения влаги у поверхности высушиваемого зерна и скорости диффузии пара через пограничный слой.

#### Объекты и методы исследований

На режим сушки зерна, обеспечивающий минимальные суммарные энергозатраты на процесс испарения влаги из зерна влияют различные факторы. Эти факторы могут быть контролируруемыми и управляемыми; контролируемыми, но не управляемыми; не контролируемыми и не управляемыми. Исследование влияния большого количества факторов, сочетающихся в произвольных соотношениях, часто приводит к неясным закономерностям и ошибочным выводам. В связи с этим, из всех факторов, влияющих на процесс сушки зерна, нами были выделены основные, оказывающее наибольшее влияние на развитие процесса, несущие наибольшую информацию. Учитывая требования к действующим факторам (управляемость, однородность и отсутствие корреляции между ними) основными факторами, характеризующими процесс сушки зерна в зерносушилках контактного типа, будут: средняя температура греющей поверхности; экспозиция сушки, скорость движения и температура воздуха в зерносушилке.

Цель исследований - установление

влияния параметров воздуха (скорости и температуры), подаваемого в тепловую камеру установки контактного типа для сушки зерна (УСЗ) на энергозатраты.

Исследования проводили в соответствии с принятой программой, содержащей в себе следующие этапы исследований: разработку, изготовление, отладку лабораторно-экспериментальных УСЗ [4...14] и проведение поисковых исследований; планирование эксперимента и разработку частных методик экспериментальных исследований; выбор измерительных средств и подготовку лабораторного оборудования и приборов к работе; проведение опытов, анализ и интерпретация полученных результатов.

Диапазоны варьирования исследуемых факторов устанавливали на основе изучения ранее выполненных исследований процессов теплового воздействия на зерно, поисковых опытов, а также исходя из конструктивных особенностей исследуемых УСЗ.

#### Результаты исследований

После обработки результатов проведенных экспериментальных исследований нами было получено следующее уравнение регрессии, характеризующее взаимосвязь скорости движения зерна и скорости движения воздуха в УСЗ и их влияние на суммарные энергозатраты на процесс испарения влаги из зерна:

$$q = 9,0667 - 2361,7v_s + 2,0075v_a + 203640v_s^2 - 177,3v_s v_a - 0,13v_a^2, \quad (4)$$

где  $q$  – удельные затраты теплоты на испарение влаги, МДж/кг;  $v_s$  – скорость движения семян, м/с;  $v_a$  – скорость движения воздуха, м/с.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия скорости движения зерна и скорости движения воздуха приведено на рисунке 2.

Рис. 2 показывает, что поверхность отклика от взаимодействия скоростей движения семян и воздуха вогнутая и имеет минимум в области эксперимента при  $v_s = 0,006...0,007$  м/с.

Уравнение регрессии, характеризую-

щее совместное влияние температуры греющей поверхности УСЗ и скорости движения воздуха на суммарные энергозатраты на процесс испарения влаги из зерна имеет вид:

$$q = -19,4851 + 0,3543t - 0,0173v_0 - 0,0014t^2 + 0,0085tv_0 - 0,1343v_0^2, \quad (5)$$

где  $t$  – температура греющей поверхности, °С.

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха, их влияния на суммарные энергозатраты приведено на рис. 3.

Анализ изменения суммарных удельных затрат энергии на испарение влаги в зависимости от скорости движения зерна, при различных значениях температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха показал, что эти изменения с достаточной степенью точности аппроксимируются зависимостями вида:

$$y = a_0 - a_1x + a_2x^2. \quad (6)$$

Коэффициенты уравнения 6 и получаемые при их подстановке в уравнение корреляционные отношения приведены в таблице.

Графическая интерпретация кривых, соответствующих получаемым уравнениям, приведена на рисунке 4.

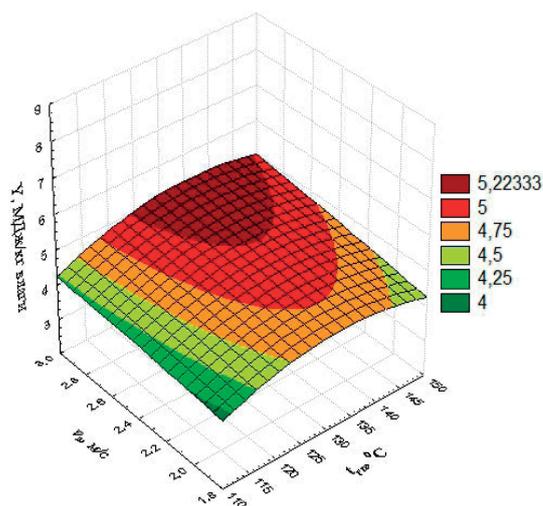


Рис. 3 – Графическая интерпретация уравнения 5

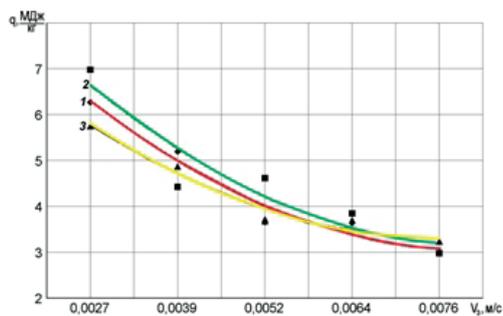
Анализ полученных кривых, соответствующих получаемым уравнениям, показал, что удельные затраты теплоты на испарение из зерна влаги с ростом скорости его движения снижаются до определённого значения, после которого начинают увеличиваться. Причём более интенсивное снижение удельных затрат теплоты на испарение влаги наблюдается при больших скоростях движения воздуха, а при меньших скоростях интенсивность уменьшается.

Проведённые исследования позволили выявить, что оптимальная скорость движения воз-

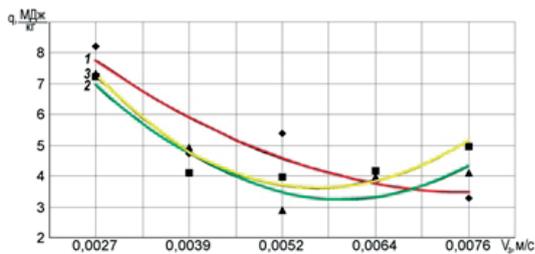
Таблица

Значения коэффициентов уравнения, характеризующего зависимость суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги от скорости движения зерна при различных значениях температуры греющей поверхности и скорости движения воздуха

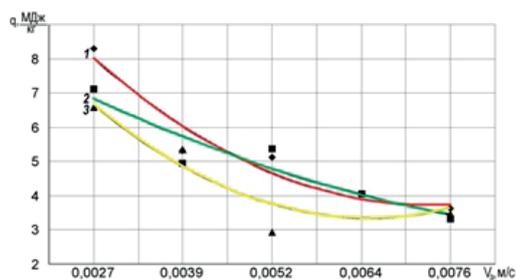
Температура греющей поверхности, °С	Скорость движения воздуха, м/с	Коэффициенты уравнения			Корреляционное отношение R
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	
115	2,8	7,9745	1,8321	0,1702	0,982
	2,5	8,3587	1,8995	0,1732	0,935
	1,9	7,1461	1,507	0,1476	0,983
125	2,8	10,14	2,6411	0,2612	0,92
	2,5	10,333	3,9611	0,5866	0,952
	1,9	10,948	4,2444	0,5847	0,961
135	2,8	10,621	2,9035	0,3061	0,97
	2,5	8,1077	1,3589	0,0849	0,936
	1,9	9,1716	2,8501	0,349	0,916
145	2,8	10,723	3,2324	0,3596	0,971
	2,5	8,7685	1,9129	0,1635	0,915
	1,9	11,213	4,0713	0,5167	0,926



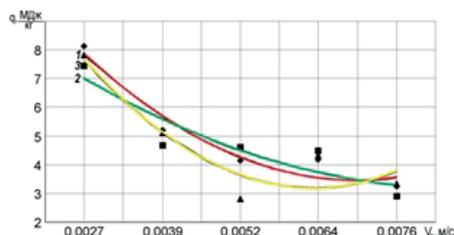
Температура греющей поверхности 115 °C



Температура греющей поверхности 125 °C



Температура греющей поверхности 135 °C



Температура греющей поверхности 145 °C

Рис. 4 - Зависимости суммарного удельного расхода теплоты на испарение влаги от скорости движения зерна: 1 –  $v_g = 2,8$  м/с; 2 –  $v_g = 2,5$  м/с; 3 –  $v_g = 1,9$  м/с

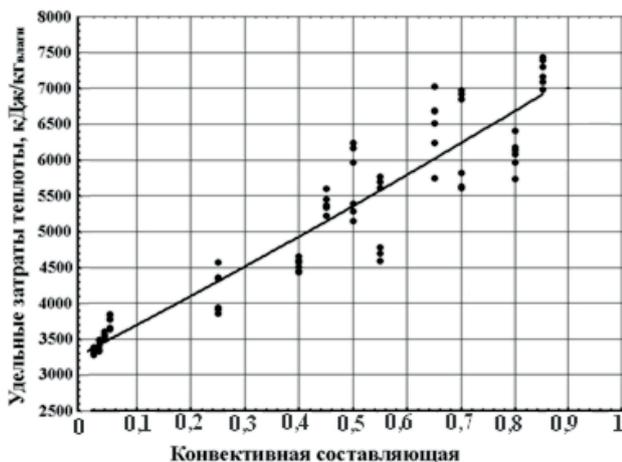


Рис. 5 – Зависимость суммарных удельных затрат теплоты на испарение влаги от доли конвективной составляющей теплопода к зерну в УСЗ

духа в УСЗ составляет 2,83 м/с, при этом затраты энергии на испарение из зерна влаги минимальны и составляют 3,59 МДж/кг [15].

Анализ влияния температуры подаваемого воздуха в УСЗ на суммарные удельные энергозатраты позволил сделать вывод, что суммарные удельные затраты теплоты на испарение влаги возрастают с увеличением конвективной составляющей подвода теплоты к обрабатываемому зерну (рис. 5).

Поэтому при сушке зерна в предложенной установке следует температуру подаваемого воздуха принимать близкой к оптимальной температуре окружающего воздуха для производственных помещений (20 °C).

#### Выводы

Таким образом, в зерносушилках с контактным способом подвода теплоты одними из основных действующих факторов, влияющих на суммарные удельные энергозатраты, являются параметры (скорость движения и температура) подаваемого в УСЗ воздушного потока. Причём в отличие от зерносушилок конвективно-го типа воздушный поток, создаваемый вентилятором, необходим для адсорбции и удаления пара из тепловой камеры. Использование при сушке зерна научно обоснованных параметров воздушного потока, подаваемого в тепловую камеру УСЗ, позволит минимизировать суммарные удельные энергозатраты на процесс испарения влаги из зерна.

#### Библиографический список

1. Курдюмов, В.И. Повышение эффективности послеуборочной обработки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин // Доклады Россельхозака-

демии. - 2011. - № 6. - С. 56-58.

2. 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.

3. Курдюмов, В.И. Обоснование теплофизических параметров установки для сушки зерна контактного типа / В.И. Курдюмов, Карпенко Г.В., Павлушин А.А., Карпенко М.А. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научное обеспечение устойчивого функционирования и развития АПК». - 2009. С. 84-87.

4. Пат. 59226 Российская Федерация, МПК F26B17/20. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 19.04.2006; опубл. 10.12.2006 г. Бюл. № 34.

5. Пат. 2323580 Российская Федерация, МПК A23B9/08. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 28.03.2006; опубл. 10.05.2008 г. Бюл. № 13.

6. Пат. 2428642 Российская Федерация, МПК F26B11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 14.04.2010; опубл. 10.09.2011 г. Бюл. № 25.

7. Пат. 2371650 Российская Федерация, МПК F26B11/14. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.Н. Зозуля; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 18.02.2008; опубл. 27.10.2009 г. Бюл. № 30.

8. Пат. 90970 Российская Федерация, МПК A23B9/08. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; заявитель и патентообладатель ФГОУ

ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 07.10.2009; опубл. 27.01.2010 г. Бюл. № 3.

9. Пат. 2436630 Российская Федерация, МПК B02B1/00. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 31.05.2010; опубл. 20.12.2011 г. Бюл. № 35.

10. Пат. 2465527 Российская Федерация, МПК F26B17/04. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 13.05.2011; опубл. 27.10.2012 г. Бюл. № 30.

11. Пат. 2428642 Российская Федерация, МПК F26B 11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 14.04.2010; опубл. 10.09.2011 г. Бюл. № 25.

12. Пат. 2453123 Российская Федерация, A23B 9/08. Устройство для сушки пищевых продуктов / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 10.11.2010; опубл. 20.06.2012 г. Бюл. № 17.

13. Пат. 96639 Российская Федерация, F26B 3/00. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.А. Постников; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 24.02.2010; опубл. 10.08.2010 г. Бюл. № 22.

14. Пат. 119862 Российская Федерация, F26B 11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 11.01.2012; опубл. 27.08.2012 г. Бюл. № 24.

15. 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.