

дифференцированного внутрпочвенного внесения твёрдых минеральных удобрений с комбинированными тукозаделывающими рабочими органами // Дисс. канд. техн. наук. – Рязань, 2005. – 154 с.

7. Черников, В.А. Повышение равномерности глубины заделки семян сахарной свеклы за счёт совершенствования конструкции сошниковой группы // Дисс. канд. тех. наук. – Воронеж, 2009. – 176 с. 11. Апрельева, М. С. Хозяйственно-допустимый и биологический пределы глубины заделки семян основных полевых культур Украины / М.С. Апрельева // Тр. Харьковского сельхозинститута, т. 132. - К., Урожай, 1970. – С. 23 – 28.

8. Пат. RU № 118 163. Секция пропаш-

ной сеялки / В.В. Косолапов, Е.В. Косолапова, А.Н. Скороходов, Опубл. 20.07.12, Бюл. № 20.

9. Косолапов, В.В. Лаповый сошник с прикатывающим бороздообразующим колесом для посева сахарной свеклы / В.В. Косолапов, А.Н. скороходов // Техника в сельском хозяйстве: 6 раз в год / учредитель: Российская академия сельскохозяйственных наук – 1941. – М.: 2012 – № 3.

10. Беляков, А.В. Совершенствование технологии посева семян бахчевых с модернизацией полозовидного сошника. - Дисс. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / А.В. Беляков; Волгоград. Волгоградская ГСХА, - В., 2007. – 168 с.

УДК 631:362.7

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПРИ КОНТАКТНОЙ СУШКЕ ЗЕРНА РАЗЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

**Курдюмов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и энергетика»; e-mail: vik@ugsha.ru

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

89084788926; e-mail: andrejpavlu@yandex.ru

**Карпенко Михаил Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технический сервис и ремонт машин»

89050357550; e-mail: karpenko.galina@yandex.ru

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

e-mail: karpenko.galina@yandex.ru

**Сутягин Сергей Алексеевич**, кандидат технических наук, e-mail: sergeysut@mail.ru

**Журавлёв Алексей Валериевич**, студент 5 курса инженерного факультета,

e-mail: zhav73@gmail.com

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

**Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных МК-2516.2012.8.**

**Ключевые слова:** сушка зерна, экспозиция сушки, предельно-допустимая температура нагрева зерна.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на тепловой режим при сушке зерна. Приведены требования к сушке зерна различных культур. Описан механизм тепло-, влагопроводности при сушке зерна. Получены аналитические зависимости, позволяющие определить режимные параметры процесса сушки зерна. Предложена установка контактного типа, приведены основные результаты исследований по оптимизации теплового режима при сушке зерна различных культур.



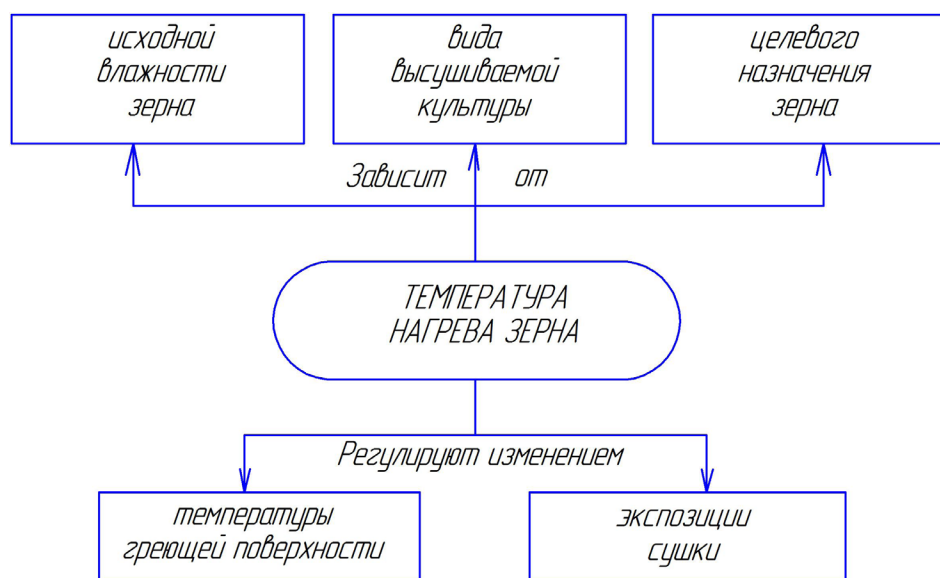


Рис. 1 – Факторы, влияющие на тепловой режим сушки зерна

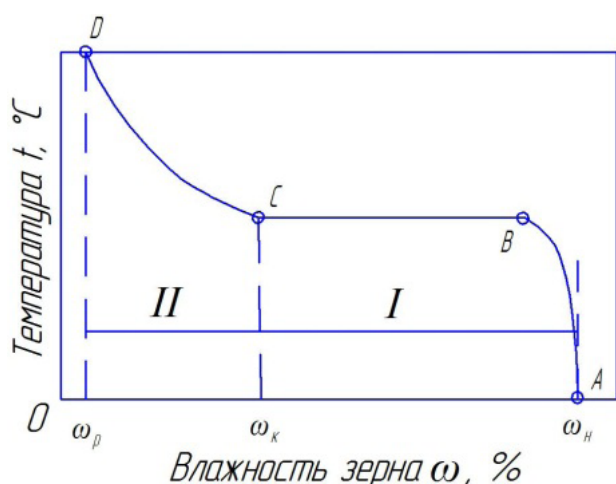


Рис. 2 – Температурная кривая:

$\omega_p$  – равновесная влажность зерна, %;  
 $\omega_k$  – критическая влажность зерна, %;  $\omega_n$  – начальная влажность зерна, %

Сушка является важным этапом при производстве зерна. В конечном итоге именно от сушки зависят качественные показатели и сохранность зерновых культур.

При сушке зерна различных культур важно правильно выбрать нужный тепловой режим, зависящий, в свою очередь, от предельно допустимой температуры нагрева зерна, которую устанавливают с учётом высушиваемой культуры, целевого использования и исходной влажности зерна (рисунок 1).

Так, температура нагрева зерна пшеницы, предназначенного для продовольственных целей, не должна превышать 55

°С, так как перегрев зерна приводит к разрушению аминокислот (лизина, триптофана), ухудшает хлебопекарные свойства, пищевую и кормовую ценность. Рожь и ячмень сушат при максимально допустимой температуре нагрева 60 °С, а овёс, у которого легко отделяются пожароопасные цветочные плёнки, – не более 50 °С [1]. При сушке зерна на семена средняя температура его нагрева не должна

превышать 39 °С. Семена зернобобовых (горох, люпин, вика и др.) при температуре нагрева свыше 30 °С растрескиваются, поэтому их сушат при более низкой температуре. С увеличением влажности зерна температуру его нагрева уменьшают, так как с ростом влажности термоустойчивость зерна снижается.

Следует отметить, что в процессе сушки зерна происходят структурно-механические, технологические и биохимические изменения свойств высушиваемого материала. Изменение этих свойств обусловлено изменением форм связи влаги с зерном и её частичным удалением путем испарения.

Одним из надежных способов изучения механизма перемещения влаги внутри зерна в процессе его сушки является исследование температурных полей. Особенности процесса сушки, зависящего не только от вида и качества обрабатываемого зерна, но и от способа теплового воздействия, выявляет детальное описание и изучение температурной кривой.

Изменение средней (интегральной) температуры материала  $t$  в процессе сушки характеризует температурная кривая (рисунок 2) [2].

В начале процесса в стадии прогрева зерна (участок АВ) температура его поверхности быстро повышается, достигая температуры мокрого термометра психрометра.

В дальнейшем на всем протяжении первого периода сушки температура зерна постоянна (участок BC). В этот период испарение влаги происходит с наибольшей скоростью. Вся теплота, сообщаемая зерну, расходуется на испарение влаги. Поэтому первый период сушки характеризуется не только постоянством скорости сушки, но и постоянством температуры высушиваемого зерна.

Начиная с первой критической точки, температура высушиваемого зерна повышается, при достижении равновесной влажности она достигнет максимального значения (участок CD). В соответствии с закономерностями изменения скорости сушки и температуры зерна второй период сушки называют периодом убывающей скорости сушки и возрастающей температуры зерна.

Сформулируем модель теплового режима процесса сушки зерна при контактном способе передачи теплоты. В зерносушилке контактного типа зерновой слой соприкасается с греющей поверхностью кожуха и нагревается путем теплопроводности. Одновременно он обдувается воздухом для удаления влаги из сушильной камеры, то есть присутствует конвективная составляющая процесса сушки. Однако конвективные потоки в сушильной камере установки относительно невелики. Поэтому в данной модели примем, что эти два процесса друг на друга не влияют, и рассмотрим только явление теплопроводности. Тепловой контакт между зерновым слоем и кожухом зерносушилки будем считать идеальным, без переходного сопротивления.

Процесс переноса теплоты внутри зерна, не осложненный массопереносом и без внутренних источников теплоты, можно охарактеризовать дифференциальным уравнением теплопроводности [3]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 t \quad (1)$$

где  $t$  – температура нагрева зерна, °C;  $\tau$  – время сушки (экспозиция), с;  $\partial t / \partial \tau$  – скорость изменения температуры, °C/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);  $\rho$  – насыпная плотность зерна, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удель-

ная теплоёмкость зерна, кДж/(кг·°C);  $1/(\rho c) = a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $x, y, z$  – текущие координаты, м;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \text{– оператор второй производной (оператор Лапласа), м}^2.$$

Слой зерна, движущийся в камере зерносушилки контактного типа, можно условно заменить моделью в виде полуограниченного тела, для которого решение уравнения (1) имеет наиболее простой вид:

$$\frac{t_{zn} - t}{t_{zn} - t_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int e^{-u^2} du, \quad (2)$$

где  $t_{zn}$  – температура греющей поверхности, °C;  $t$  – температура нагрева зерна, °C;  $t_0$  – начальная температура зерна, постоянная по всему объёму, °C;

$u = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$  – аргумент подынтегральной функции.

Правая часть выражения (2) является специальной функцией ошибок (функция Лапласа):

$$\operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int e^{-u^2} du$$

Тогда уравнение (2) можно представить в виде

$$t = t_{zn} - (t_{zn} - t_0) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}. \quad (3)$$

Плотность теплового потока можно определить из зависимости:

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right) = -\lambda \nabla t, \quad (4)$$

где  $\nabla = \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z}$  – оператор первой производной Лапласа (градиент) [2].

Пользуясь уравнениями (3) и (4), можно определить количество теплоты  $\Delta Q_n$ , Дж, которое передается от греющей поверхности зерносушилки зерновому слою за любой промежуток времени от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ , с, через поверхность площадью  $S$ , м<sup>2</sup>.

Для этого надо уравнение (3) продифференцировать по  $x$  и подставить полученную производную в уравнение (4), после чего последнее выражение проинтегрировать по времени в пределах от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ :

$$\Delta Q_i = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda \rho c} (t_{\bar{x}} - t_0) (\sqrt{\tau_2 - \tau_1}) \sqrt{b^2 - 4ac} \quad (5)$$

Таким образом, количество теплоты, необходимое для испарения влаги с поверхности зерна при контактном способе сушки, зависит от температуропроводности материала греющей поверхности, разности температур греющей поверхности и высушиваемого зерна и экспозиции сушки.

Экспозицию сушки для первого периода можно определить из выражения:

$$\tau_I = \frac{\omega_1^c - \omega_{k_1}^c}{N}, \quad (6)$$

где  $\omega_1^c$  и  $\omega_{k_1}^c$  – соответственно средние значения начальной и первой критической влажности зерна, %;  $N$  – скорость сушки в период постоянной скорости сушки, %/ч;

Если сушка проходит только в период постоянной скорости, то в уравнение (6) вместо  $\omega_{\varepsilon_1}^c$  необходимо подставить значение конечной влажности зерна  $\omega_2^c$ .

Если процесс сушки во втором периоде начинается после периода постоянной скорости сушки, то начальное условие будет иметь вид:

$$u = (u_{\delta} - u_{\gamma}),$$

где  $u_{\delta}$  – влагосодержание центрального слоя высушиваемого зерна, кг влаги/(кг сухого вещества·м);  $u_{\gamma}$  – влагосодержание поверхностного слоя высушиваемого зерна, кг влаги/(кг сухого вещества·м).

Во втором периоде сушки уравнение влагопереноса имеет вид:

$$N = \frac{a_m}{l^2} \left( \frac{1}{\pi^2 + \frac{1}{3Bi_m}} \right) (\omega_2 - \omega_{\delta}^{\bar{n}}), \quad (7)$$

где  $Bi_m$  – массообменный критерий Био;  $a_m$  – коэффициент влагообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·кг);  $l$  – толщина зернового слоя, м;  $\omega_2$  – влажность зерна в начале второго периода сушки, %;  $\omega_{\delta}^{\bar{n}}$  – среднее значение равновес-

ной влажности зерна, %.

Из уравнения (7) следует, что во втором периоде скорость сушки находится в прямой зависимости от текущей влажности зерна в начале второго периода сушки  $\omega^c$  и в обратной от толщины слоя высушиваемого зерна  $l$ . Кроме того существенное влияние на скорость сушки во втором периоде оказывает коэффициент  $a_m$ , который в свою очередь изменяется в процессе сушки.

Точно решить уравнение (7) не представляется возможным из-за весьма сложного и не всегда определимого характера зависимости коэффициента  $a_m$  от температуры и влажности. Поэтому при технических расчетах в уравнении (7) заменяют комплекс, стоящий перед выражением  $(\omega_2 - \omega_{\delta}^{\bar{n}})$ , на коэффициент  $K_c$ . Тогда уравнение (7) можно записать в виде

$$N = K_{\bar{n}} (\omega_2 - \omega_{\delta}^{\bar{n}}), \quad (8)$$

где  $K_c$  – коэффициент сушки.

Интегрируя уравнение (8) для периода убывающей скорости сушки в пределах от  $\omega_{k_1}^c$  (первая критическая влажность) до  $\omega_2^c$  (конечная влажность), получим:

$$\omega_2^{\bar{n}} = (\omega_{\varepsilon_1}^{\bar{n}} - \omega_{\delta}^{\bar{n}}) \exp(-K_{\bar{n}} \tau_{II}) + \omega_{\delta}^{\bar{n}}, \quad (9)$$

или

$$\tau_{II} = \frac{1}{K_{\bar{n}}} \ln \left( \frac{\omega_{k_1}^c - \omega_p^c}{\omega_2^c - \omega_p^c} \right). \quad (10)$$

Коэффициент сушки  $K_c$  зависит от свойств зерна и параметров процесса сушки (температуры греющей поверхности, экспозиции сушки, исходной влажности зерна и др.), что требует получения определённых зависимостей для каждого частного случая. При сушке зерна значение критической влажности  $\omega_{k_1}^c$  варьирует в довольно широких пределах и зависит от теплового режима сушки.

Приведённые выше аналитические зависимости послужили основой при исследовании особенностей теплового режима при сушке зерна различных культур в разработанной нами установке контактного типа (УКТ) [4] (рис. 3). Результаты проведённых исследований приведены в таблице.

Таблица 1

Сравнительная характеристика оптимальных режимных показателей при сушке зерна различных культур в УКТ

Показатели	Высушиваемая культура		
	Овёс	Рожь	Пшеница
Средняя температура греющей поверхности, °С	69	94	87
Скорость движения воздуха, м/с	1,33	1,33	1,33
Температура подаваемого воздуха, °С	23,8	23,4	23,6
Средний разовый влагосъём, %	2,85	2,75	2,77
Удельные затраты энергии на процесс испарения влаги из зерна, МДж/кг	3,7	3,86	3,82
Пропускная способность установки, кг/ч	300,2	404,1	482,2
Экспозиция сушки, с	40	45	45
Максимальная температура зерна на выходе из установки, °С	38,5	40	39

Как видно из полученных данных, параметры теплового режима при сушке зерна зависят от вида высушиваемой культуры. Так, максимальное значение температуры греющей поверхности приходится на рожь, это связано прежде всего с тем, что рожь содержит больше водорастворимых веществ. Белковый комплекс у нее более устойчив, к тому же рожь содержит большое количество слизи [5]. Поэтому зерно ржи выдерживает более высокую температуру нагрева.

Таким образом, тепловой режим при сушке зерна играет важную роль и от него зависит конечное качество высушиваемого продукта. Факторы, влияющие на тепловой режим при контактной сушке, многообразны, основные среди них – температура греющей поверхности и экспозиция сушки. Критерием оптимизации в этом случае может служить максимальная температура зерна на выходе из УКТ, характеризующая его качество. При правильно организованном процессе сушки зерна в УКТ, соблюдая оптимальные режимные параметры, на выходе мы можем получить зерно, удовлетворяющее требованиям соответствующего целевого назначения.

#### Библиографический список

1. Гоголев, Ф.Т. Сушка зерна. - М.: Сельхозгиз, 1939. – 294 с.
2. Лыков, А.В. Теория переноса энергии и вещества / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов.

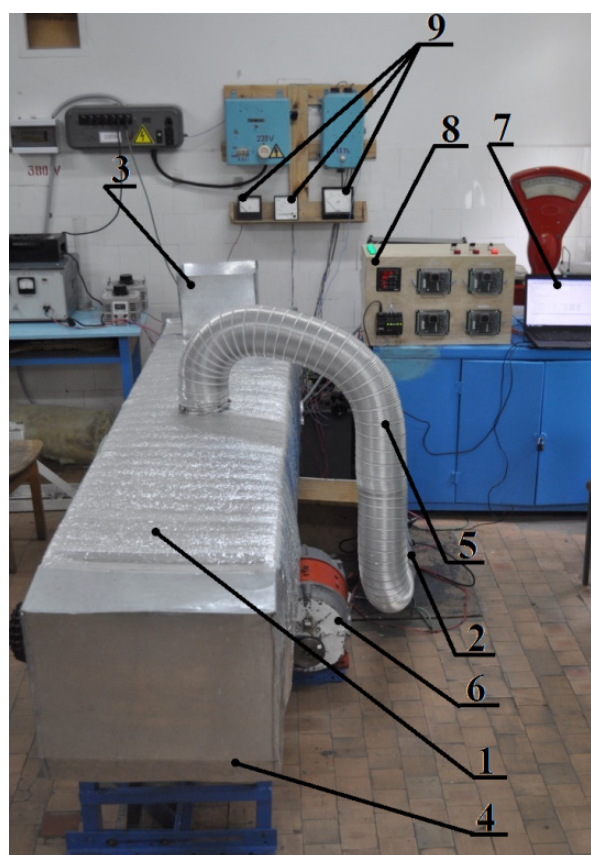


Рис. 3 – УКТ при проведении исследований: 1 - кожух; 2 - электрокалорифер; 3 - загрузочный бункер; 4 - выгрузное окно; 5 - воздуховод; 6 - электродвигатель; 7 - персональный компьютер; 8 - блок автоматического управления температурным режимом; 9 - контрольно-измерительная аппаратура

- Минск: Изд-во Акад. Наук БССР, 1954. – 357 с.

3. Антошин, И.М. Теоретические основы массообменных процессов пищевых производств / И.М. Антошин. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 344 с.

4. Патент РФ № 2436630. Устройство

для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; Оpubл. 20.12.2011 г. Бюл. № 35.

5. Карпов, Б.А. Технология послеуборочной обработки и хранения зерна. - М.: Агропромиздат, 1987. – 288 с.

УДК 623.436

## РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СМЕСИТЕЛЯ-ДОЗАТОРА ДИЗЕЛЬНОГО СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА

**Уханов Александр Петрович\***, доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО « Пензенская государственная сельскохозяйственная академия»\*  
440014, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30  
Тел.: (8412)628-517 E-mail: dspgsha@mail.ru

**Голубев Владимир Александрович\*\***, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»  
Тел.: 8-842-31-11-44

E-mail: golubevugsha@mail.ru

**Киреева Наталья Сергеевна\*\***, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика»

E-mail: kireeva/23@mail.ru

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

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1; Тел: 8-842-31-11-44.

**Ключевые слова:** дизельное смесевое топливо, топливная система низкого давления дизеля, смеситель-дозатор топлива, горчичное масло, горчично-минеральное топливо, параметры

Предложена конструкция статического смесителя-дозатора, обеспечивающего приготовление смесевое топлива в системе питания дизеля непосредственно в процессе работы трактора. Выполнено теоретическое обоснование конструктивных и режимных параметров и представлены результаты лабораторных исследований смесителя-дозатора топлива.

В соответствии с ГОСТ Р 52808-2007 одним из видов моторного топлива для с.-х. тракторов является дизельное смесевое топливо (ДСТ), которое в наименьшей степени требует конструктивной адаптации двигателя и имеет незначительные отклонения показателей физических и теплотворных свойств от соответствующих свойств минерального дизельного топлива (ДТ) [1, 2, 3]. Наиболее целесообразным, по техническим и экономическим соображениям, является приготовление ДСТ непосредственно в системе питания двигателя в процессе рабо-

ты тракторного агрегата [4]. Для этого в топливную систему низкого давления дизеля (ТСНД) устанавливаются смеситель-дозатор топлива, имеющий два входных и один выходной канал. Входные каналы соединены топливопроводами с баками минерального ДТ и растительного масла, выходной канал – с топливоподкачивающим насосом (ТПН).

Наличие в ТСНД относительно длинных трубопроводов, имеющих различное проходное сечение, приводит к появлению в трубопроводах потоков, направленных поперек основного потока движения жидкости и создает завихрения, способствующие