

## ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Научная статья

УДК 631.563.2

doi: 10.47737/2307-2873\_2021\_36\_4

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ В ЭЛЕМЕНТАРНОМ СЛОЕ

© 2021. Галина Владимировна Карпенко<sup>1✉</sup>, Владимир Иванович Курдюмов<sup>2</sup>,  
Андрей Александрович Павлушин<sup>3</sup>, Михаил Александрович Карпенко<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ульяновский государственный аграрный университет, Ульяновск, Россия, 432017

<sup>1</sup>karpenko.galina@yandex.ru

**Аннотация.** Во многих регионах России период уборки совпадает с сезоном дождей, и до 60 % убранного зерна находится во влажном состоянии, требует сушки. Соответственно возникает потребность в энергосберегающих сушильных установках. В целях обеспечения энергоэффективности зерносушилок изучили влагоотдающие способности зерна. Исследования проведены в лаборатории кафедры «АМ и БЖД» Ульяновского ГАУ на сушильных установках. Провели исследования процесса сушки зерна пшеницы в элементарном слое, в ходе которого получили кривые сушки и температурные кривые зерна при различных параметрах сушильного агента. Исследовали процесс сушки элементарного слоя зерна при скоростях движения воздуха 0,15; 0,4; 0,8; 1,5 м/с. Исследования показали, что увеличение скорости движения воздуха от 0,15 м/с до 1,5 м/с незначительно влияет на характер изменения кривых сушки. При этом скорость сушки определяется не внешним тепловлагообменом, а скоростью перемещения влаги от центра зерна к поверхности. Провели исследование процесса сушки зерна в элементарном слое в условиях, исключающих заметное влияние скорости движения воздуха на процесс ( $v_{\text{в}} = 0,6 \dots 0,8$  м/с), привели кривые сушки зерна пшеницы при различной температуре сушильного агента. В результате исследований установлено, что при сушке зерна пшеницы в слое, толщина которого не превышает максимального размера единичного зерна, в период падающей скорости сушки температура зерна в течение 5...10 минут приближается к температуре воздуха; анализ экспериментальных данных показал, что зависимость (1) с достаточной степенью точности описывает кривые сушки зерна пшеницы, обеспечивая хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных; для повышения энергоэффективности установок с единичным слоем сушки зерна, скорость теплоносителя должна находиться в пределах 0,06 – 0,15 м/с, при этом удельные затраты теплоты на испарение 1 кг влаги находятся в пределах 3,7-4,1 МДж/кг, что на 21,6...19,5 % ниже, чем при традиционной сушке толстого слоя.

**Ключевые слова:** сушка зерна, сушка горячим воздухом, энергосбережение, энергозатраты, теплообмен

**Введение.** Согласно данным Росстата, урожай зерновых и зернобобовых культур в России в 2020 году превысил 133 млн т, в том числе урожай пшеницы составил более 85 млн т. За 2021 год эти показатели составили соответственно 122 млн и 78 млн т. Так как во многих регионах России период уборки совпадает с сезоном дождей, то до 60 % убранных зерен находится во влажном состоянии и требует сушки, соответственно возникает потребность в энергосберегающих сушильных установках.

*Цель исследования* – изучить влагоотдающую способность единичного слоя зерна для последующей разработки мероприятий по повышению энергоэффективности зерносушилок.

**Методика.** Определяли основные особенности сушки зерна пшеницы в элементарном слое. Изучение влагоотдающей способности зерен проводили в тонком элементарном слое, где созданы одинаковые условия сушки каждого отдельного зерна. Наиболее полно отвечает этому требованию слой толщиной в одно зерно. Можно использовать слой толщиной в несколько зерен, однако при этом необходимо обеспечить такой расход сушильного агента, чтобы его параметры в процессе сушки изменялись незначительно.

Исследование процесса сушки элементарного слоя позволяет перейти к расчету толстого слоя зерна. Кроме того, оно имеет самостоятельное значение, так как режим сушки перемешиваемой зерновой массы выбирают по пограничному слою, находящемуся, так же как и элементарный слой, в условиях наиболее интенсивного теплообмена.

Различные аспекты сушки зерна единичным слоем изучали М.Ю. Лурье, Н. Дитрих, А.В. Лыков, В.С., Уколов, З.Л. Тиц [1, 2, 3, 4] и другие. Однако указанные работы во многом противоречивы и не дают исчерпывающих материалов для обоснованного вы-

бора математического выражения скорости сушки отдельного зерна.

В связи с этим нами были выполнены исследования сушки зерна пшеницы в слое, толщина которого не превышала максимального размера единичного зерна. При этом были построены кривые сушки и зависимости температуры зерна от различных параметров теплоносителя при конвективной сушке и степени нагрева поверхности при контактной сушке зерна. Так как большинство эксплуатируемых в РФ сушильных установок конвективного типа, рассмотрим влияние изменения параметров агента сушки на процесс удаления влаги из зерна. Материалом для опытов служило зерно пшеницы различных сортов, естественной влажности и увлажненное (выдержанное в течение 3 суток). Установлено, что сортовые особенности зерна и способ приобретения влажности незначительно влияют на его влагоотдающую способность.

Исследования проведены в лаборатории кафедры «АМ и БЖД» Ульяновского ГАУ на сушильных установках, новизна технических решений конструкций которых подтверждена патентами РФ [1, 6]. В опытах изменяли температуру и скорость движения сушильного агента, при различной начальной влажности зерна. Скорость движения и температуру воздуха, подаваемого внутрь установки, контролировали с помощью цифрового термоанометра СЕМ DT-318. Относительную влажность зерна определяли с помощью влагомера Wille-55. После окончания процесса сушки измеряли температуру выгруженного из установки зерна, используя инфракрасный термометр MASTECH MS6530.

Оценочными показателями приняты: температура и конечная влажность зерна, а также удельные затраты теплоты на испарение 1 кг влаги. Особенности методики исследований подробно описаны в ранее опубликованных работах [1, 5].

**Результаты.** Рассмотрим математическое выражение, описывающее кривую сушки зерна в элементарном слое. Выводу уравнения кривой сушки посвящен ряд теоретических работ, в которых устанавливаются законы перемещения влаги внутри материала [7, 8]. Однако теория еще не располагает достаточно простыми и вместе с тем точными формулами для определения продолжитель-

ности сушки материала. Вместе с тем, имеется ряд работ, в которых на основании экспериментальных данных устанавливаются чисто эмпирические зависимости. Часто эти зависимости подбирают по аналогии между сушкой и другими сходными процессами [9].

Аналитический метод получения кривой сушки разработали Н.Ф. Докучаев и М.С. Смирнов [10]:

$$\omega_c = \omega_H^c - \frac{\tau}{b + K_1 \tau}, \quad (1)$$

где  $\omega^c$  – средняя интегральная влажность материала в момент времени  $\tau$ , %;  
 $\omega_H^c$  – начальная влажность материала, %;  
 $b$  и  $K_1$  – коэффициенты, зависящие от вида материала и от режима сушки [6];

$\tau$  – время сушки, мин.

Дифференцируя уравнение (1), получим уравнение скорости сушки:

$$\frac{d\omega^c}{d\tau} = \frac{b}{(b + K_1 \tau)^2} \quad (2)$$

Коэффициенты  $b$  и  $K_1$  можно определить графически. Их находят также по методу наименьших квадратов непосредственно из опытных данных. При этом, константы  $b$  и  $K_1$

могут быть определены с известным приближением по 2...3 экспериментальным точкам. Для этого предлагается использовать следующие формулы:

$$K_1 = \frac{1}{\omega_H^c} \text{ и } b = \frac{\tau_1}{\omega_H^c - \omega_1^c},$$

где  $\tau_1$  – время, близкое к начальному, мин;  $\omega_1^c$  – соответствующая ему влажность, %.

Имея значения  $b$  и  $K_1$  для различных моментов времени, пользуясь уравнением (2), можно построить кривую скорости сушки.

На рисунке 1 представлена зависи-

мость  $\frac{\tau_1}{\omega_H^c - \omega^c} = f(\tau)$  при исходной влажности зерна 35 %.

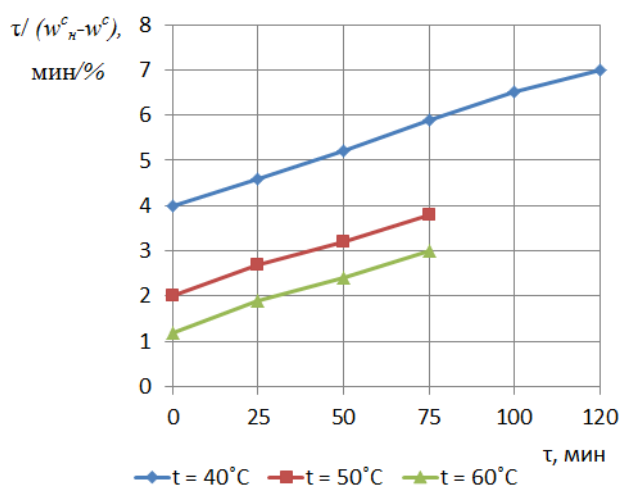


Рис. 1. Зависимость  $\frac{\tau_1}{\omega_H^c - \omega^c} = f(\tau)$  при сушке в элементарном слое

Fig. 1. Dependence  $\frac{\tau_1}{\omega_H^c - \omega^c} = f(\tau)$  on drying in an elementary layer

Представленная графическая зависимость близка к прямолинейной. Следовательно, ее можно выразить уравнением (1).

В результате исследований выявлено, что коэффициенты  $b$  и  $K_1$  изменяются в зависимости как от температуры и влажности теплоносителя, так и от исходной влажности зерна. Использование уравнения (2) упрощает построение кривой скорости сушки.

Многие исследователи при обработке экспериментальных данных по сушке отдельных зерен применяли зависимость, основанную на том, что скорость процесса в каждый момент времени пропорциональна количеству влаги в зерне, которое может быть удалено при данных параметрах сушильного агента, т. е. в общем виде:

$$\frac{d\omega^c}{d\tau} = K(\omega^c - \omega_p^c),$$

где  $\omega^c$  и  $\omega_p^c$  – соответственно, текущая и равновесная влажность зерна, %.

К этой зависимости приходят различными путями. Она может быть получена, исходя из закономерностей диффузии влаги в зерне. В

качестве основы теории диффузии взято утверждение, что «скорость перемещения влаги внутри материала пропорциональна градиенту концентрации влаги» [11], т.е.:

$$\frac{dU}{d\tau} = K\nabla^2 U, \tag{3}$$

где  $U$  – влагосодержание материала, г/кг;  
 $\tau$  – время сушки, мин;

$K$  – коэффициент теплопроводности, мин<sup>-1</sup>;  
 $\nabla^2$  – оператор Лапласа.

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

С учетом явления термовлагопроводности основное дифференциальное уравнение

$$\frac{dU}{d\tau} = K\nabla^2 U + K\delta\nabla^2\theta, \quad (4)$$

где  $\delta$  – коэффициент термовлагопроводности, %/град.;  $\theta$  – температурный градиент, К/м.

Решение этого уравнения дает возможность найти влагосодержание ( $U$ ) любой точки тела (координаты  $x, y, z$ ) в каждый конкретный момент времени. В этом случае условно принимают, что коэффициенты влагопроводности и термовлагопроводности являются величинами постоянными, не зависящими от влажности материала.

Для случая конвективной сушки зерна величина градиента температуры незначительна и явление термовлагопроводности можно не учитывать. Если рассматривать только одномерную задачу, то уравнение (3) примет вид:

$$\frac{dU}{D\tau} = K \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Исходя из того, что к началу периода убывающей скорости сушки влаги по сечению материала распределяется по параболическому закону [12, 13], то начальное условие для этого периода (при  $\tau = 0$ ) будет иметь вид:

$$U = U_{ц} - \left(\frac{x}{R}\right)^2 (U_{ц} - U_n),$$

где  $U_{ц}$  – влагосодержание в центре материала, г/кг;  $U_n$  – влагосодержание на поверхности зерна, г/кг;  $R$  – определяющий геометрический размер, м (например, для шара – радиус).

Граничное условие для этого периода будет определяться уравнением баланса влаги:

$$m = K\gamma_0 \left(\frac{dU}{dx}\right)_{нов} = \beta\gamma_0 (U_n - U_p), \quad (6)$$

где  $m$  – плотность потока влаги, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\beta$  – коэффициент влагообмена; мг/(м<sup>2</sup>·ч·Па);  $\gamma_0$  – удельный вес сухого зерна, Н/м<sup>3</sup>;  $U_p$  – равновесное влагосодержание, г/кг.

После ряда преобразований получаем:

$$-\frac{d\omega^c}{d\tau} = K(\omega^c - \omega_p^c), \%/\text{ч}, \quad (7)$$

где  $K$  – так называемый коэффициент сушки, зависящий от режима сушки материала и его геометрических размеров, 1/ч.

Интегрируя это выражение в пределах от  $\omega_n^c$  до  $\omega^c$ , получаем:

$$\frac{\omega^c - \omega_p^c}{\omega_n^c - \omega_p^c} = e^{-K\tau}, \quad (8)$$

откуда

$$\tau = \frac{2,3}{K} \log \frac{\omega_n^c - \omega_p^c}{\omega^c - \omega_p^c}. \quad (9)$$

Следовательно, если закономерность испарения влаги из материала соответствует уравнению (9), то кривая сушки, построенная в координатах  $\lg(\omega^c - \omega_p^c)$  и  $\tau$ , должна изоб-

ражаться в виде прямой. Тангенс угла наклона этой прямой характеризует коэффициент сушки, который можно вычислить по уравнению:

$$K = \frac{\ln(\omega_H^c - \omega_p^c) - \ln(\omega^c - \omega_p^c)}{\tau}, \text{ 1/ч,} \quad (10)$$

где  $\tau$  – время, ч.

Некоторые зарубежные исследователи [14, 15, 16] приходят к уравнению (8) чисто эмпирическим путем. Для того, чтобы подобрать уравнение кривой сушки, они используют один из математических приемов – спрямление кривых. С этой целью строят кривые сушки по полулогарифмической шкале. Величину  $\omega_p^c$  подбирают так, чтобы произошло спрямление кривых, и называют ее условно «динамической» равновесной влажностью. Благодаря этому обстоятельству в

значительной степени упрощается практический расчет продолжительности сушки.

В процессе экспериментальных исследований элементарный слой зерна высушивали при различных скоростях движения теплоносителя (воздуха). На рисунке 2 показаны зависимости температуры и влажности зерна пшеницы от времени сушки при разных скоростях теплоносителя (0,15; 0,4; 0,8; 1,5 м/с).

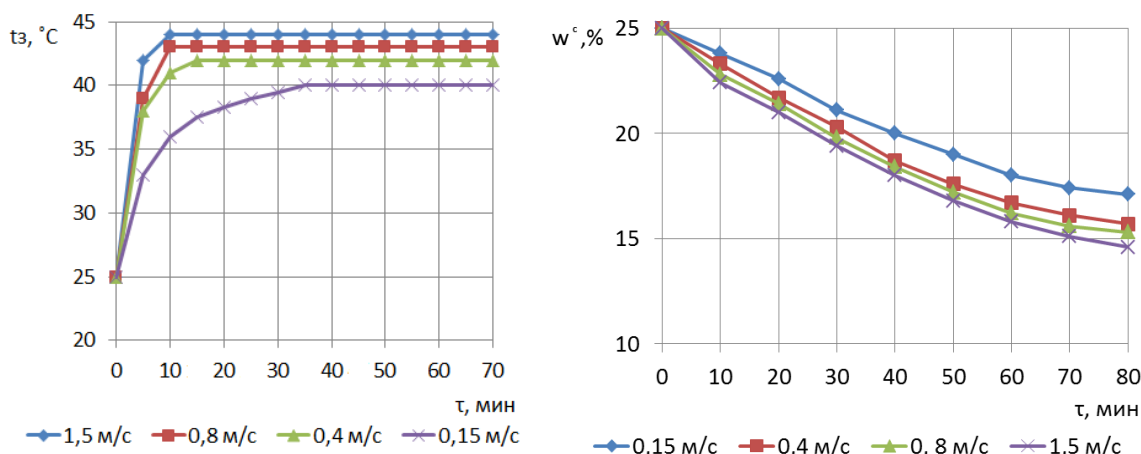


Рис. 2. Изменение температуры и влажности единичного слоя зерна пшеницы, от скорости движения воздуха

Fig 2. Change in temperature and humidity of a single layer of wheat grain on the speed of air movement

Представленные зависимости свидетельствуют о том, что сушка происходит при ее падающей скорости, так как отсутствуют прямолинейные участки. Это подтверждается и характером температурных кривых: температура зерна в процессе сушки возрастает и превышает температуру мокрого термометра (температуру зерна замеряли мультиметром с использованием термопары).

Из рисунка 2 следует, что в пределах варьирования скорости воздуха от 0,15 м/с до 1,5 м/с, тенденция изменения кривых сушки почти одинакова. Таким образом, для рассматриваемой ситуации скорость сушки зависит не от внешнего тепло- и влагообмена, а от скорости движения влаги от центральной части зерновки к ее поверхности  $v_b$ .

На скорость  $v_b$  оказывает влияние и температура материала. С ростом значений скорости воздуха зерно начинает прогреваться быстрее. Но анализ кривых изменения температуры показал высокую скорость прогрева зерна, несмотря на разные условия. За 5...10 минут температура зерна почти достигает температуры воздуха. Так как время прогрева зерна относительно мало по сравнению с суммарным временем сушки, то скорость теплоносителя почти не изменяет характер кривых сушки. Лишь снижение скорости движения воздуха в сушильной установке до 0,06 м/с заметно ухудшает условия прогрева.

Дальнейшее исследование процесса сушки зерна в элементарном слое проводили в условиях, исключающих заметное влияние скорости движения воздуха на процесс ( $v_b = 0,6...0,8$  м/с).

На рисунке 3 изображены кривые сушки зерна пшеницы при различной температуре сушильного агента. По приведенным кривым можно судить о том, что при возрастании температуры теплоносителя интенсивность съема влаги возрастает.

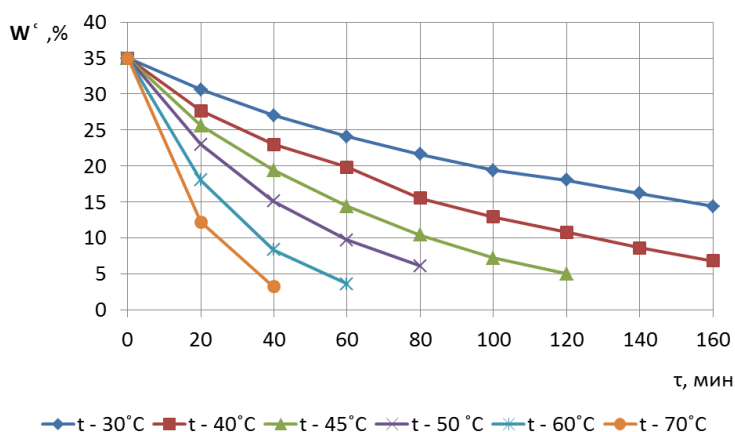


Рис. 3. Зависимость влажности зерна пшеницы в элементарном слое от времени сушки при изменении температуры теплоносителя

Fig. 3. Dependence of the moisture content of wheat grain in the elementary layer from the drying time when the temperature of the coolant changes

По этим же кривым можно определить время, необходимое для снижения влажности зерна с  $\omega_n^c = 35\%$  до кондиционного состояния, т.е. до  $\omega_k^c = 15\%$  ( $\omega_n^c$ ,  $\omega_k^c$  – соответственно начальная и конечная влажности зерна, выраженные в % к весу сухого вещества).

Ниже приведены данные, характеризующие зависимость продолжительности сушки зерна пшеницы до кондиционной влажности от температуры воздуха.

Таблица 1

Длительность сушки зерна пшеницы до кондиционной влажности при различной температуре теплоносителя

Температура теплоносителя (воздуха), °C	30	40	45	50	60	70
Продолжительность сушки, мин	151	82	58	40	25	18

Кроме температуры воздуха, на длительность сушки различных материалов влияет и его влажность. На рисунке 4 приведены зави-

симости влажности зерна пшеницы, которую сушили при температуре теплоносителя 50 °C, и его разной исходной влажности.

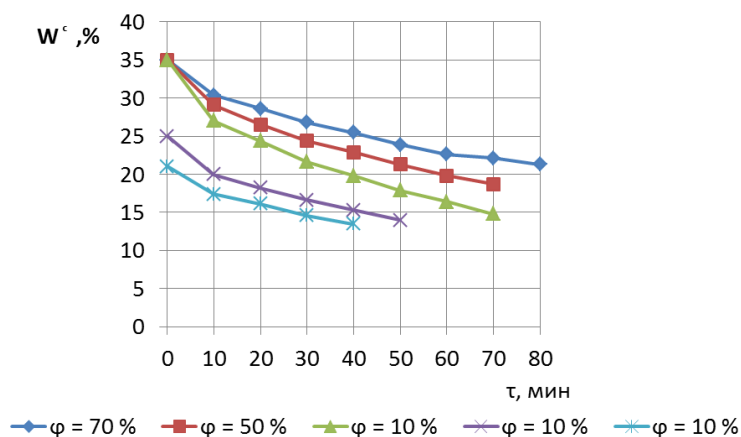


Рис. 4. Изменение влагосодержания зерна пшеницы различной начальной влажности, находящейся в элементарном слое, при относительной влажности воздуха  $\varphi = 10; 50; 70\%$

Fig. 4. Change in moisture content of wheat grain with different initial moisture content, located in an elementary layer, with a relative humidity of  $\varphi = 10; 50; 70\%$

Рисунок 4 иллюстрирует влияние начальной влажности зерна пшеницы на процесс его сушки. Чем более влажный воздух, тем выше влагосодержание поверхности зерна и тем меньше разность концентрации влаги внутри материала. Следовательно, с увеличением влажности воздуха уменьшается скорость перемещения влаги из внутренних слоев зерна к периферии, и замедляется процесс сушки.

**Выводы.** 1. При сушке зерна пшеницы в слое, толщина которого не превышает максимального размера единичного зерна, в период падающей скорости сушки, температура зерна в течение 5...10 минут приближается к темпе-

ратуре воздуха. Анализ экспериментальных данных показал, что зависимость (1) с достаточной степенью точности описывает кривые сушки зерна пшеницы, обеспечивая хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

2. Для повышения энергоэффективности установок с единичным слоем сушки зерна, скорость теплоносителя должна находиться в пределах 0,06-0,15 м/с, при этом удельные затраты теплоты на испарение 1 кг влаги находятся в пределах 3,7-4,1 МДж/кг, что на 21,6...19,5 % ниже, чем при традиционной сушке толстого слоя.

#### Список источников

1. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Карпенко Г.В., Сутягин С.А. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа. Ульяновск: УГСХА им. П. А. Столыпина. 2013. 290 с.
2. Голубкович А.В., Павлов С.А. Совершенствование технологии сушки семян и зерна повышенной влажности // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 3. С. 21-23.
3. Цугленок Н.В. Планирование экспериментальных исследований по определению эффективных режимов ВЧ- и СВЧ-обработки семян // Modern Science. 2019. № 7-2. С. 24-27.
4. Pavlushin A., Sutyagin S., Karpenko G., Artemiev V. Research of a machine with a belt conveyor for drying grain // E3S Web of Conferences. «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020». 2020. С. 01071.
5. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Карпенко Г.В., Сутягин С.А. Влияние параметров зерносушильной установки на качество сушки // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 6. С. 74-76.
6. Устройство для сушки зерна: пат. Рос. Федерация. № 2371560/ Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Зозуля И.Н.; опубл. 27.10.2009; бюл. № 30.
7. Голубкович А.В., Павлов С.А. Теплоперенос при двухэтапной сушке зерна // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2010. № 4. С. 26-29.
8. Козлов А.В. Повышение эффективности сушки семян зерновых культур в камерных сушильках напольного типа: дис. канд. технических наук: 05.20.01. Благовещенск, 2017. 152 с.



9. Бритиков Д.А. Моделирование процессов тепло- и массопереноса при сушке зерна // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 2. С. 36-39.
10. Трисвятский Л.А., Мельник Б.Е. Технология приема, обработки, хранения зерна и продуктов его переработки. М.: Колос, 1983. 351 с.
11. Журавлёв А.П. Технология сушки зерна в комбинированном слое // Хлебопродукты. 2012. № 7. С. 42-43.
12. Вобликов Е.М., Буханцов В.А., Маратов Б.К., Прокопец А.С. Послеуборочная обработка и хранение зерна. Ростов-на-Дону: Издательский центр «МарТ». 2001. 231 с.
13. Vargas W.L., McCarthy J.J. Heat conduction in granular materials // AIChE Journal. 2001. № 47. P. 1052-1059.
14. Converse H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin. Amer. Soc. Agr. Engrs., 2006. № 855.
15. Yadollahinia A.R., Omid M., Rafie S. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products // Int. J. Agri. Biol. 2008. № 10. Pp. 61-65.
16. Hohn H.Y. Getreidelagerung-Trocknung-Belufung // Muhle + Mischfuttertechn, 1992; Jg.129, H. 5, P. 43-55.

## FEATURES OF WHEAT GRAIN DRYING PROCESS IN THE ELEMENTARY LAYER

© 2021. Galina V. Karpenko<sup>1✉</sup>, Vladimir I. Kurdyumov<sup>2</sup>,  
Andrey A. Pavlushin<sup>3</sup>, Mikhail A. Karpenko<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ulyanovsk State Agrarian University, Novy Venets boulevard, 1, Ulyanovsk, Russia, 432017

<sup>1</sup>karpenko.galina@yandex.ru

**Abstract.** In many regions of Russia, the harvesting period coincides with the rainy season and up to 60% of the harvested grain is in a wet state, requires drying. Accordingly, there is a need for energy-saving drying plants. In order to ensure the energy efficiency of grain dryers, the moisture-yielding abilities of grain were studied. Studies of the drying process of wheat grain in the elementary layer were carried out, during which drying curves and temperature curves of grain were obtained at various parameters of the drying agent. The drying process of an elementary grain layer at air velocities of 0.15; 0.4 was investigated; 0.8; 1.5 m/s. Studies have shown that an increase in air velocity from 0.15 m/s to 1.5 m/s does not significantly affect the nature of changes in drying curves. At the same time, the drying rate is determined not by external heat and moisture exchange, but by the rate of moisture transfer from the center of the grain to the surface. A study of the grain drying process in the elementary layer was carried out under conditions that exclude a noticeable effect of the air velocity on the process ( $v_e = 0.6 \dots 0.8 \text{ m/s}$ ), the curves of drying wheat grain at different temperatures of the drying agent were given. According to the obtained curves, it was determined that with an increase in air temperature, moisture intake increases sharply. Studies have shown that according to the drying curves of wheat grain obtained at different humidity, air humidity has a significant effect on the drying process along with temperature. A mathematical expression describing a curved line on a grain drying graph in an elementary layer is given. As a result of the performed studies, it was found out that the drying process of individual grains takes place during a period of falling drying speed. The drying rate of individual grains is limited mainly by the process of moving moisture from their central part to the periphery. Under these conditions, the grain temperature approaches the air temperature for 5...10 minutes. The main parameters of the drying agent that determine the drying process of individual grains are its temperature and moisture content. The drying rate increases with increasing temperature and decreasing moisture content of the drying agent.

**Key words:** grain drying, hot air drying, energy saving, energy consumption, heat exchange

### References

1. Kurdjumov V.I., Pavlushin A.A., Karpenko G.V., Sutjagin S.A. Teplovaja obrabotka zerna v ustanovkah kontaktного типа (Heat treatment of grain in contact-type installations), Ul'janovsk: UGSHA im. P.A. Stolypina, 2013, 290 p.

2. Golubkovich A.V., Pavlov S.A. Sovershenstvovanie tehnolo-gii sushki semjan i zerna povyshennoj vlazhnosti (Improvement of the technology of drying seeds and grain of high humidity), Sel'skohozjajstvennyye mashiny i tehnologii, 2011, No. 3, pp. 21-23.
3. Cuglenok N.V. Planirovanie jeksperimental'nyh issledova-nij po opredeleniju jeffektivnyh rezhimov VCh- i SVCh-obrabotki semjan (Planning experimental studies to determine effective modes of high-frequency and microwave-treatment of seeds), Modern Science, 2019, No. 7-2, pp. 24-27.
4. Pavlushin A., Sutyagin S., Karpenko G., Artemiev V. Research of a machine with a belt conveyor for drying grain, E3S Web of Conferences. «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020», 2020, p. 01071.
5. Kurdjumov V.I., Pavlushin A.A., Karpenko G.V., Sutyagin S.A. Vlijanie parametrov zernosushil'noj ustanovki na kachestvo sushki (The influence of the parameters of the grain dryer on the quality of drying), Doklady Rossijskoj akademii sel'skohozjajstvennyh nauk, 2012, No. 6, pp.74-76.
6. Ustrojstvo dlja sushki zerna: pat. Ros. Federacija (Grain drying device: Pat. Russian Federation), № 2371560, Kurdjumov V.I., Pavlushin A.A., Zozulja I.N.; opubl. 27.10.2009; bjul. No. 30.
7. Golubkovich A.V., Pavlov S.A. Teplomassoperenos pri dvuhjetapnoj sushke zerna (Heat and mass transfer during two-stage grain drying), Sel'skohozjajstvennyye mashiny i tehnologii, 2010, No. 4, pp. 26-29.
8. Kozlov A.V. Povyshenie jeffektivnosti sushki semjan zernovyh kul'tur v kamernyh sushilkah napol'nogo tipa (Increasing the efficiency of drying grain seeds in floor-type chamber dryers), dis. kand. tehniceskikh nauk: 05.20.01. Blagoveshensk, 2017, 152 p.
9. Britikov D.A. Modelirovanie processov teplo- i massoperenosa pri sushke zerna (Modeling the processes of heat and mass transfer during grain drying), Sovremennye naukoemkie tehnologii, 2010, No. 2, pp. 36-39.
10. Trisvjatskij L.A., Mel'nik B.E. Tehnologija priema, obrabotki, hranenija zerna i produktov ego pererabotki (Technology for receiving, processing, storing grain and its processed products), M, Kolos, 1983, 351 p.
11. Zhuravljov A.P. Tehnologija sushki zerna v kombinirovannom sloe (Combined layer grain drying technology), Hleboprodukty, 2012, No. 7, pp. 42-43.
12. Voblikov E.M., Buhancov V.A., Maratov B.K., Prokopec A.S. Posleuborochnaja obrabotka i hranenie zerna (Post-harvest handling and storage of grain), Rostov-na-Donu: Izda-tel'skij centr «MarT», 2001, 231 p.
13. Vargas W.L., McCarthy J.J. Heat conduction in granular materials, AIChE Journal, 2001, No. 47, pp. 1052-1059.
14. Converse H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin. Amer. Soc. Agr. Engrs., 2006, № 855.
15. Yadollahinia A.R., Omid M., Rafie S. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products, Int. J. Agri. Biol. 2008, No.10, pp. 61-65.
16. Hohn H.Y. Getreidelagerung-Trocknung-Belufung, Muhle + Mischfuttertechn, 1992. Jg.129, H. 5, pp. 43-55.

*Сведения об авторах*

**Г.В. Карпенко**<sup>1✉</sup> – канд. тех. наук, доцент;

**В.И. Курдюмов**<sup>2</sup> – д.-р. тех. наук, профессор;

**А.А. Павлушин**<sup>3</sup> – д.-р. тех. наук, профессор;

**М.А. Карпенко**<sup>4</sup> – канд. тех. наук, доцент.

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ульяновский государственный аграрный университет, бульвар Новый Венец, 1, Ульяновск, Россия, 432017

<sup>1</sup>karpenko.galina@yandex.ru

*Information about the authors*

**G.V. Karpenko**<sup>1✉</sup> – Cand. Tech. Sci., Associate Professor;

**V.I. Kurdyumov**<sup>2</sup> – Dr. Tech. Sci., Professor;

**A.A. Pavlushin**<sup>3</sup> – Dr. Tech. Sci., Professor;

**M.A. Karpenko**<sup>4</sup> – Cand. Tech. Sci., Associate Professor.

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Ulyanovsk State Agrarian University, 1, Novy Venets Boulevard, Ulyanovsk, Russia, 432017

<sup>1</sup>karpenko.galina@yandex.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Authors' contributions:** the authors declare that they have no conflicts of interest.

*Статья поступила в редакцию 17.11.2021; одобрена после рецензирования 25.11.2021; принята к публикации 07.12.2021. The article was submitted 17.11.2021; approved after reviewing 25.11.2021; accepted for publication 07.12.2021.*