


## Экспериментально-статистическое исследование процесса сушки зерна тритикале при противоточно-прямоточном продувании зернового слоя

Татьяна Н. Тертычная <sup>1</sup>	<a href="mailto:tertychnaya@yandex.ru">tertychnaya@yandex.ru</a>	 0000-0001-8185-3424
Александр А. Шевцов <sup>2,3</sup>	<a href="mailto:shevalol@rambler.ru">shevalol@rambler.ru</a>	 0000-0001-5745-8301
Сергей С. Куликов <sup>3</sup>	<a href="mailto:sergeifonkulikov@yandex.ru">sergeifonkulikov@yandex.ru</a>	

<sup>1</sup> Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия



<sup>2</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

<sup>3</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия

**Аннотация.** Выполнены экспериментальные исследования кинетики процесса сушки зерна тритикале при противоточно-прямоточном продувании зернового слоя. В экспериментальной установке осуществлялось программированное изменение направления потока сушильного агента через слой зерна и эмитировались реальные условия подачи сушильного агента через подводящие и отводящие короба шахтной зерносушилки. Анализ кривых сушки и скорости сушки зерна тритикале показал наличие только периода убывающей скорости сушки, в котором интенсивность диффузии влаги значительно меньше интенсивности влагообмена. Организация эксперимента позволила в полной мере обеспечить его адаптацию к промышленным шахтным зерносушилкам, в которых процесс сушки осуществляется в непрерывном режиме. По результатам исследования предложена эмпирическая модель процесса сушки в виде экспоненциальной функции, устанавливающей однозначную функциональную связь между текущей влажностью зерна и основными параметрами процесса: температурой, скоростью, влагосодержанием сушильного агента и толщиной продуваемого слоя. С учетом требований к технологическим режимам сушки зерна тритикале проанализировано соотношение между температурой зерна и его влажностью при различных значениях режимных параметров, которое предложено использовать в качестве ограничения на температурный режим сушки.

**Ключевые слова:** зерно тритикале, процесс сушки, кинетические закономерности, кривая сушки, функциональная связь, эмпирическая модель

## Experimental and statistical analysis research of the triticale grain drying process when coun-tercurrent-direct-flow blowing of the grain layer

Tatiana N. Tertychnaya <sup>1</sup>	<a href="mailto:tertychnaya@yandex.ru">tertychnaya@yandex.ru</a>	 0000-0001-8185-3424
Alexander A. Shevtsov <sup>2,3</sup>	<a href="mailto:shevalol@rambler.ru">shevalol@rambler.ru</a>	 0000-0001-5745-8301
Sergey S. Kulikov <sup>3</sup>	<a href="mailto:sergeifonkulikov@yandex.ru">sergeifonkulikov@yandex.ru</a>	

<sup>1</sup> Voronezh State agrarian University named after Emperor Peter I, Michurina street, 394087, Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

<sup>3</sup> Military Training and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», st. Old Bolsheviks, 54a, Voronezh, 394064, Russia

**Abstract.** Experimental studies of the kinetics of the process of drying triticale grain during counter-current-direct blowing of the grain layer were carried out. In the experimental installation, a programmed change in the direction of the drying agent flow through the grain layer was carried out and the actual conditions of the drying agent supply through the supply and discharge boxes of the shaft grain dryer were emitted. Analysis of drying curves and drying rate of triticale grain showed the presence of only a period of decreasing drying rate, in which the intensity of moisture diffusion is significantly less than the intensity of moisture exchange. The organization of the experiment made it possible to fully adapt it to industrial mine grain dryers, in which the drying process is carried out in a continuous mode. Based on the results of the study, an empirical model of the drying process is proposed in the form of an exponential function, which establishes a unique functional relationship between the current moisture of the grain and the main parameters of the process: temperature, speed, moisture content of the drying agent and the thickness of the blown layer. Taking into account the requirements to the process modes of grain drying, the triticale analyzes the ratio between the grain temperature and its humidity at various values of the mode parameters, which is proposed to be used as a restriction on the drying temperature mode.

**Keywords:** grain triticale, the drying process, kinetic regularities, curve drying, functional communication, empirical model

### Для цитирования

Тертычная Т.Н., Шевцов А.А., Куликов С.С. Экспериментально-статистическое исследование процесса сушки зерна тритикале при противоточно-прямоточном продувании зернового слоя // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 4. С. 38–46. doi:10.20914/2310-1202-2020-4-38-46

### For citation

Tertychnaya T.N., Shevtsov A.A., Kulikov S.S. Experimental and statistical analysis research of the triticale grain drying process when coun-tercurrent-direct-flow blowing of the grain layer. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 38–46. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-4-38-46

## Введение

Конвективная сушка злаковых культур в шахтной зерносушилке относится к нестационарным процессам, происходящим в капиллярно-пористой среде, имеющей хаотическую структуру, изменяющуюся во времени и пространстве [1, 2]. Наличие фазовых превращений, неоднородности зерна, сложность биохимических превращений существенно затрудняют физическое моделирование процесса сушки зерна и создание строгой математической теории. Поэтому в инженерной практике используются экспериментальные методы исследования, связанные с получением кривых сушки в условиях стационарных режимов, когда параметры сушильного агента постоянны. Однако такие режимы не являются характерными для промышленного процесса сушки зерна, когда для сохранения его высокого качества осуществляется ступенчатая сушка при повышении температуры сушильного агента и уменьшении его линейной скорости [3–5]. В таком случае объем экспериментальных исследований значительно увеличивается из-за необходимости варьирования режимных параметров. Для разработки и обоснования ступенчатого режима сушки представляется целесообразным использование результатов исследования кинетики сушки при постоянных технологических параметрах.

Зерносушилки шахтного типа – самые распространенные в отечественном сельском хозяйстве, основным конструктивным элементом которых является шахта, представляющая собой вертикальную камеру прямоугольного сечения с поперечно продуваемым движущимся зерновым слоем. Толщина слоя обычно составляет 100–250 мм и не превышает 500 мм. Стенки шахты делают либо сетчатыми или жалюзийными, либо внутри шахты размещают систему каналов (коробов), через которые подводят свежий и отводят отработавший агент сушки [4, 6].

Обычно в шахтных сушилках зерно находится в плотном, малоподвижном слое. Скорость воздуха в слое невелика (0,2–0,4 м/с), а скорость движения зерна примерно в 100 раз меньше скорости воздуха в связи с этим активная поверхность зернового слоя значительно меньше суммарной [6].

## Материалы и методы

Исследования режимов сушки зерна тритикале проводились на экспериментальной установке, принципиальная схема которой со средствами контроля и управления представлена на рисунке 1. Установка изготовлена

по схеме [3] и представлена в условиях АО мелькомбинат «Воронежский» [5] (рисунок 1).

В установке моделировалось смешанное противоточно-прямоточное продувание зернового слоя путем запрограммированного изменения направления агента сушки (рисунок 2). Эмитировался процесс сушки в шахтной зерносушилке: слой зерна не перемещался, а изменялось направление потока сушильного агента, что в реальных условиях соответствует подаче сушильного агента через подводящие короба и его отводу из зоны сушки через отводящие короба.

Установка состоит из вертикальной цилиндрической сушильной камеры 1, кольцевой системы воздухопроводов, распределителя воздуха на четыре прохода 3, нагнетательного центробежного вентилятора 4, калорифера 5.

Сушильная камера секционирована по высоте. В четырех секциях устанавливались четыре съемные кассеты 6, в каждой из которых толщина зернистого суммарного слоя составляла 100–300 мм. Общая высота камеры 0,5 м. Диаметр камеры 0,4 м. Это дало возможность практически устранить пристеночный эффект, так как соотношение диаметров камеры и зерен тритикале превышало критическое, равное 16–20. По высоте сушильной камеры для каждой кассеты были приварены герметично закрывающиеся штуцера, через которые определяли температуру и влажность зерна.

Кольцевая система 2 подводящих и отводящих воздухопроводов подключена так, что в каждый данный момент времени две из четырех кассет с суммарной толщиной слоя 100–250 мм продувались агентом сушки последовательно снизу-вверх, а две другие – сверху вниз.

Место ввода сушильного агента под кассеты имитирует подводящий короб шахтной сушилки, а место вывода – отводящий короб. Направление потока агента сушки изменяли многоходовыми распределителями. Последовательность и периодичность изменения направления потока соответствовала периодичности перемещения зернового слоя относительно коробов в шахте зерносушилки.

Средняя скорость перемещения зерна в шахтных зерносушилках не превышает 3–5 мм/с, а расстояние между рядами подводящих и отводящих коробов составляет 200 мм. Отсюда время пребывания зерна между горизонтальными рядами составляет около 60 с. Поэтому воздухораспределители приводились в действие через каждую минуту. Перед нагнетающим вентилятором установлен электрокалорифер, состоящий из трубчатых электронагревателей (ТЭНов) типа «С», обеспечивающих равномерный нагрев сушильного агента (воздуха) и прогрев установки перед выполнением опытов.

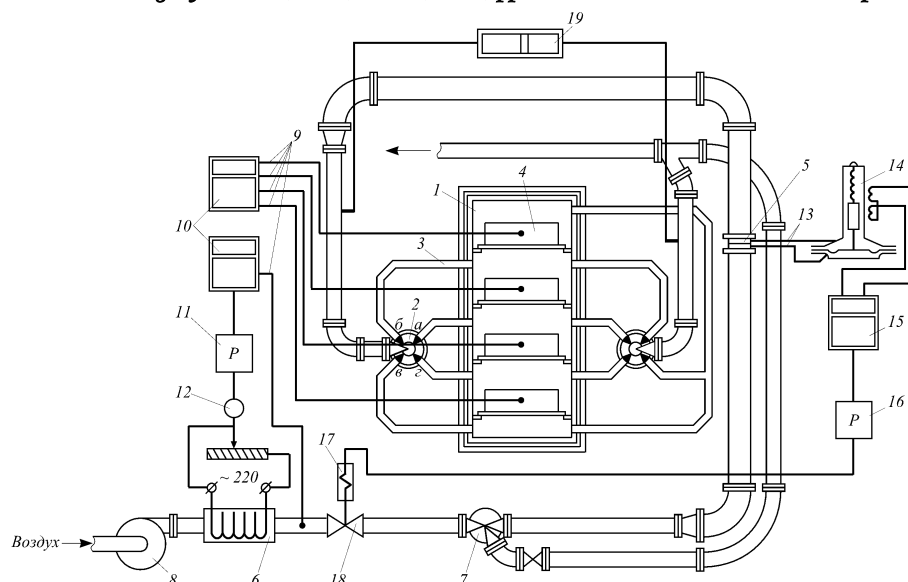


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса сушки зерна: 1 – сушильная камера, 2 – распределитель воздуха, 3 – кольцевая система воздухопроводов, 4 – кассета с зерном, 5 – диафрагма, 6 – калорифер, 7 – трехходовой кран, 8 – вентилятор, 9 – термопары, 10 – потенциометр, 11, 16 – регуляторы, 12, 17 – исполнительные механизмы, 13 – импульсные трубки, 14 – дифманометр ДМ, 15 – вторичный прибор КСД, 18 – заслонка, 19 – гигрометр «Волна-2М»

Figure 1. Scheme of experimental plant for study of grain drying process: 1 – drying chamber, 2 – air distributor, 3 – annular system of air ducts, 4 – grain cartridge, 5 – diaphragm, 6 – heater, 7 – three-way valve, 8 – fan, 9 – thermocouples, 10 – potentiometer, 11, 16 – regulators, 12, 17 – actuators, 13 – pulse tubes, 14 – DM differential pressure gauge, 15 – secondary KSD device, 18 – shutter, 19 – hygrometer “Wave-2M”

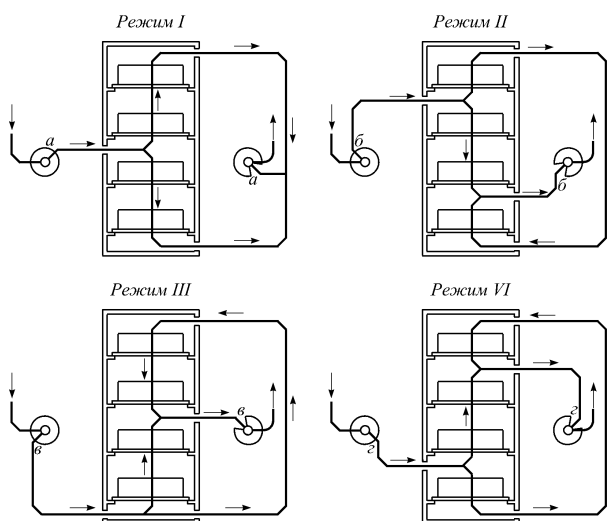


Рисунок 2. Режимы подачи сушильного агента через кассеты

Figure 2. Drying agent supply modes through cassettes

Экспериментальная установка оснащена системами автоматического регулирования температуры и расхода сушильного агента, измерения и записи температуры зерна в контрольных точках. Система автоматического управления температурой сушильного агента включала самопишущий потенциометр КСП-3, датчик – хромель-копелевую термопару ТХК (диаметр электрода 0,1 мм), исполнительный механизм – магнитный пускатель ПМЕ-321,

с помощью которого осуществлялось управление работой электрокалорифера со световой индикации его работы.

Требуемая температура сушильного агента поддерживалась путем изменения мощности ТЭНов с помощью реостата. Измерение температуры зерна в кассетах проводилось термопарами ТХК и электронным автоматическим самопишущим многоточечным потенциометром КСП-4. За температуру зерна принималась температура, измеренная с помощью термопары, введенной в единичное зерно и расположенное в середине зернового слоя. Система автоматического регулирования расходом сушильного агента включала расходомер, состоящий из камерной диафрагмы ДНК-6 и дифманометра ДМ 3583, вторичный прибор дифференциально-трансформаторной системы КСД с регулятором, исполнительный механизм МЭО, установленный на подводящем воздуховоде. Контроль влагосодержания сушильного агента на входе и выходе из сушильной камеры осуществлялся цифровым гигротермометром СЕМ DT-321S. Влажность высушенного зерна определялась методом высушивания проб в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 403 К в течение 40 мин. Опыты проводились с зерном озимой тритикале сорта Горка урожая 2019 г., выращенного в Таловском районе Воронежской области. Перед сушкой зерно предварительно замачивалось и искусственно увлажнялось

до достижения величины начальной влажности 22–26% к общей массе продукта. При этом отлежка зерна производилась с перемешиванием при температуре 288–293 К в течение 8 ч. Для проведения опытов установка выводилась на заданный режим работы путем ее прогрева горячим воздухом в течение 30 мин. Режимные параметры при сушке зерна тритикале изменялись в диапазоне: температура, скорость и влагосодержание сушильного агента  $T = 363\text{--}393\text{ К}$ ;  $v = 0,2\text{--}1,2\text{ м/с}$ ;  $x = 0,001\text{--}0,015\text{ кг/кг}$ ; толщина продуваемого слоя  $h = 0,10\text{--}0,25\text{ м}$ .

Экспериментальные кривые сушки и нагрева зерна тритикале, а также кривые скорости сушки, полученные методом графического

дифференцирования, свидетельствуют о наличии периода убывающей скорости сушки (рисунки 3, 4). Несмотря на разнообразие режимов, кривые сушки и нагрева имеют одинаковый характер. Это означает, что в пределах допустимых температур нагрева зерна процесс сушки протекает при постепенном уменьшении скорости испарения влаги и интенсивном возрастании температуры зерна, то есть темпы нагрева зерна опережают скорость его сушки. Экспериментальные кривые сушки зерна тритикале носят экспоненциальный характер и к концу сушки асимптотически приближаются к установившемуся значению равновесной влажности  $W_p$ .

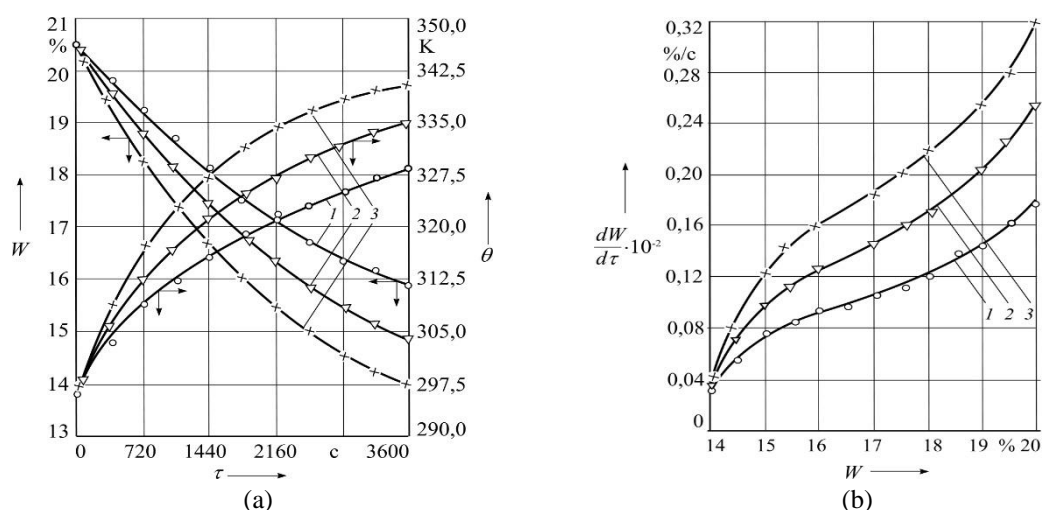


Рисунок 3. Кривые сушки и нагрева зерна тритикале (а); кривые скорости сушки зерна тритикале (б),  $v = 0,7\text{ м/с}$ ;  $T = 393\text{ К}$ ;  $x_0 = 0,020\text{ кг/кг}$ ;  $h, \text{ м}$ : 1 – 0,25; 2 – 0,15; 3 – 0,10

Figure 3. Curves of drying and heating of grain of triticale (a); curve speeds of drying of grain of triticale (b),  $v = 0.7\text{ м/с}$ ;  $T = 393\text{ К}$ ;  $x_0 = 0.020\text{ кг/кг}$ ;  $h, \text{ м}$ : 1 – 0.25; 2 – 0.15; 3 – 0.10

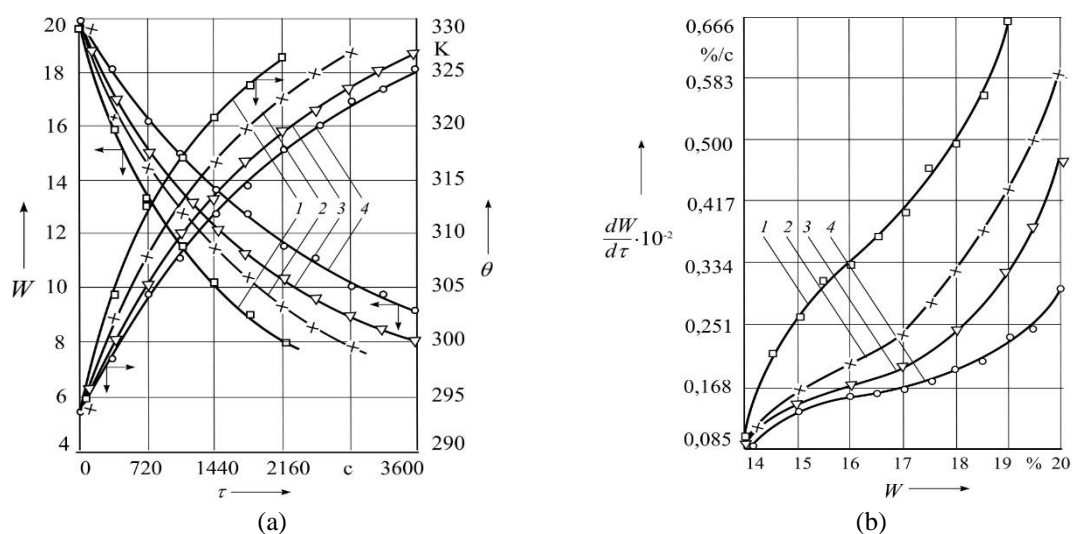


Рисунок 4. Кривые сушки и нагрева зерна тритикале (а); кривые скорости сушки зерна тритикале (б),  $v = 1,1\text{ м/с}$ ;  $T = 363\text{ К}$ ;  $h$ : 1 – 0,25 м;  $x_0, \text{ кг/кг}$ : 1 – 0,001; 2 – 0,005; 3 – 0,010; 4 – 0,015

Figure 4. Triticale grain drying and heating curves (a); triticale grain drying rate curves (b),  $v = 1.1\text{ м/с}$ ;  $T = 363\text{ К}$ ;  $h$ : 1 – 0.25 м;  $x_0, \text{ кг/кг}$ : 1 – 0.001; 2 – 0.005; 3 – 0.010; 4 – 0.015

Поэтому в качестве аппроксимирующей функции было использовано экспоненциальное уравнение

$$(W - W_p) / (W - W_n) = \exp(-k T^m v^n x_o^z h^p \tau). \quad (1)$$

Последовательная подстановка в уравнение (1) основных параметров процесса – температуры  $T$ , скорости  $v$  и влагосодержания  $x_o$  сушильного агента, толщины продуваемого слоя  $h$  требовала соответствующей коррекции коэффициента  $k$  и уточнения показателей степеней  $m, n, z$  и  $p$  соответственно при  $T, v, x_o$  и  $h$ . В этом случае для определения параметров модели  $m, n, z, p$  был использован метод средних [7, 9], который позволил обеспечить достаточно высокую степень идентификации модели (1) экспериментальным кривым сушки.

Определение коэффициентов эмпирической модели кинетики сушки зерна тритикале осуществляли при следующих условиях

$$\begin{aligned} T_i (i = 1, \dots, 5); \quad v_j (j = 1, \dots, 5); \\ x_{oq} (m = 1, \dots, 5); \quad h_n (n = 1, \dots, 5). \end{aligned} \quad (2)$$

Одним из результатов проведенных исследований явился предлагаемый метод расчета процесса сушки зерна с экспериментальным определением необходимых коэффициентов.

Построение эмпирической модели кинетики сушки зерна тритикале в виде функциональной зависимости  $W = f(T, v, x_o, h, \tau)$  осуществлялось по экспериментальным данным. При этом статистическими методами определялись численные значения параметров модели, для которых приближение к данной функции оказывалось наилучшим.

Для зерна тритикале продовольственного назначения хорошего качества параметры  $m, n, z$  и  $p$  оказались равными соответственно 5, 2, -2 и -2, причем каждый из них определял степень влияния  $T, v, x_o$  и  $h$  на величину  $W$ , а формула (1) приведена к виду:

$$\begin{aligned} (W - W_p) / (W - W_n) = \\ = \exp \left[ -8,22 \cdot 10^{-15} (T - 273)^5 v^2 x_o^{-2} h^{-2} \tau \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Эмпирическая модель (3) справедлива в следующей области изменения параметров процесса:  $17\% \leq W \leq 25\%$ ;  $353 \text{ K} \leq T \leq 398 \text{ K}$ ;  $0,6 \text{ м/с} \leq v \leq 1,2 \text{ м/с}$ ;  $2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг} \leq x_o \leq 15 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг}$ ;  $0,1 \text{ м} \leq h \leq 0,3 \text{ м}$ .

Переменные  $T, v, x_o$  и  $h$  принимали дискретные значения и их число фиксировано:

$$\begin{aligned} W_n, \%: 18; 19; 20; 21; 22\%; \\ T, \text{ K}: 353; 363; 373; 383; 393; \\ v, \text{ м/с}: 2,0; 4,0; 5,0; 6,0; \\ x_o, \text{ кг/кг}: 0,001; 0,004; 0,008; 0,010; 0,015; \\ h, \text{ м}: 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30. \end{aligned}$$

Коэффициент сушки  $k_{ij}$ , соответствующий фиксированным  $T, x_o, h, v$ , определяли из условия минимума выражения:

$$\sum_{q=1}^6 \sum_{n=1}^5 \left\{ \ln \left( \frac{W_{q,i,j,n} - W_p}{W_n - W_p} \right) - k T_i^5 v_j^2 x_{oq}^{-2} h_n^{-2} \tau \right\} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Расчетная формула для определения коэффициента сушки для каждой комбинации режимных параметров имеет вид

$$k_{ij} = \frac{\ln [(W_{q,i,j,n} - W_p) / (W_n - W_p)]}{T_i^5 v_j^2 x_{oq}^{-2} h_n^{-2} \tau}. \quad (5)$$

Режимные группы определяли парой технологических параметров  $x$  и  $h$  при постоянных  $T$  и  $v$ . Для всей совокупности режимных групп коэффициент  $k$  рассчитывали по программе «Статистика» [11]:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 k_{i,j}}{25} = 8,22840 \cdot 10^{-15}. \quad (6)$$

Ниже дается статистическое обоснование такого выбора коэффициента  $k$ . С этой целью по методике [7–10] была проведена оценка доверительного интервала, покрывающего коэффициент  $k$  с надежностью  $\gamma = 0,95$ .

Вычислена дисперсия коэффициента:

$$D_k = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (k_{ij} - \bar{k})^2}{n - 1} = 5,747501 \quad (7)$$

и его среднеквадратические отклонения:

$$\sigma = \sqrt{D_k} = 2,397394. \quad (8)$$

Найден доверительный интервал коэффициента  $k$ :

$$8,212 \cdot 10^{-15} \leq k \leq 8,233 \cdot 10^{-15} \quad (9)$$

Проверку гипотезы о нормальности распределения исследуемой величины проводили по  $\chi^2$ -критерию [7, 8]. Коэффициент  $k$  рассматривался как случайная величина, а его распределение сравнивали с кривой стандартного нормального распределения:

$$y = f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \approx 0,4 e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (10)$$

Проиллюстрирована разбивка исходных данных на классы, построена гистограмма и полигон распределения случайной величины (рисунок 5). Расчет  $\chi^2$ -критерия выполняли в табличной форме по программе «Статистика» [9, 10].

Результаты расчетов приведены в таблица 1. Значения  $\chi^2$  вычислены по формуле

$$\chi^2 = \sum_{n_{кл}-1}^7 \frac{(A - E)}{E}, \quad (11)$$

где  $n_{кл}$  – число классов;  $A$  – наблюдаемая абсолютная частота;  $E$  – ожидаемая частота по стандартному нормальному распределению.

В таблице 1 критерий  $\chi^2 = 0,5288$ . Число степеней свободы  $\nu = n_{кл} - 1 - 2 - 2$ , так как оценивалось два параметра  $k$  и  $\bar{s}_k$  ( $n_{кл} = 7$  – число классов), где  $\bar{s}_k$  – средняя дисперсия нормально распределенной случайной величины  $k$ . Найдено табличное значение  $\chi^2_{(2,10)} = 12,017 > 0,5288 = \bar{\chi}^2$ .

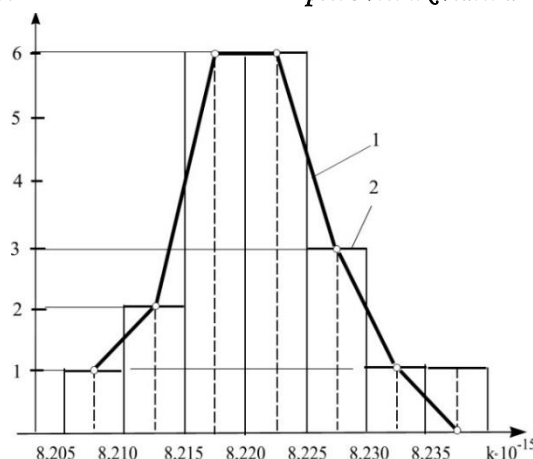


Рисунок 5. Графическое изображение распределения частот в области доверительного интервала: 1 – гистограмма распределения; 2 – полигон распределения

Figure 5. Graphic representation of frequency distribution in the confidence interval area: 1 – histogram of distribution; 2 – distribution polygon

Таблица 1.

Процедура вычисления критерия  $\chi^2$

Table 1.

Procedure for Calculating Criteria  $\chi^2$

Средины интервалов $a \cdot 10^{-15}$	Частоты $A$	$a^2 \cdot 10^{-30}$	$A \cdot a \cdot 10^{-15}$	$(A \cdot a) 2 \times 10^{-30}$	$(a - \bar{a}) \cdot 10^{-15}$
8,2075	1	67,3630	8,2075	67,3630	-0,0128
8,2125	2	67,4451	16,425	134,8902	-0,0078
8,2175	6	67,5273	49,305	405,1638	-0,0028
8,2225	6	67,6095	49,335	405,657	0,0022
8,2275	3	67,6917	24,6825	203,0751	0,0072
8,2325	1	67,7740	8,2325	67,7740	0,0122
	19		156,1875	1283,9231	

$z = \frac{a - \bar{a}}{\bar{s}}$	Ордината $f(z)$ из таблицы	$E = f(z) \times Sa$	$A - E$	$(A - E)^2$	$\chi^2 = \sum_{n_{кл}-1}^7 \frac{(A - E)}{E}$
3,878	0,0283	0,8144	0,1856	0,0344	0,0422
2,36	0,0620	1,78	0,22	0,0484	0,0271
0,84	0,1804	5,19	0,81	0,6561	0,1264
0,66	0,1826	5,255	0,745	0,555	0,1056
2,18	0,0940	2,705	0,295	0,187	0,0321
3,69	0,0224	0,6446	0,3554	0,126	0,1954
					0,5288

Таким образом, гипотеза о том, что наблюдаемая частота распределена нормально, принята на 10%-ом уровне, расхождение эмпирических и теоретических частот незначимое.

Следовательно, данные наблюдений согласуются с гипотезой нормального распределения коэффициента  $k$ , соответствующего всей совокупности режимных групп.

Из анализа влияния режимных параметров на процесс сушки зерна тритикале в сушилке при противоточно-прямоточном продувании зернового слоя следует, что повышение температуры

теплоносителя во всех случаях интенсифицирует процесс и ведет к уменьшению времени сушки. Однако возможности повышения температуры ограничиваются технологическими требованиями, связывающими допустимую температуру нагрева зерна  $\Theta$  с его влажностью  $W$ . Поэтому расчет среднеинтегральных температур нагрева зерна по высоте шахты сушиллки следует проводить с учетом ограничений, накладываемых на режимные параметры процесса, что позволит обеспечить необходимые термовлажностные условия в зерне и сохранить его качество [11–15].

На рисунке 6 представлены рассчитанные по модели кривые сушки зерна тритикале, соответствующие им кривые нагрева и экспериментальные точки. Выборочное сравнение режимов сушки по совокупности экспериментальных и расчетных данных показал удовлетворительную сходимость результатов со средним квадратичным отклонением 5–7%.

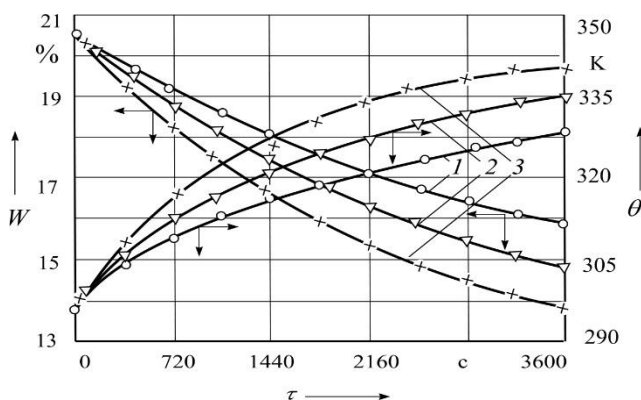


Рисунок 6. Расчетные кривые нагрева и сушки зерна тритикале при различных значениях температуры сушильного агента:  $T$ , К: 1 – 353, 2 – 373, 3 – 393;  $v = 1,2$  м/с;  $x_0 = 0,003$  кг/кг

Figure 6. Calculated curves of triticale grain heating and drying at different values of drying agent temperature:  $T$ , К: 1 – 353, 2 – 373, 3 – 393;  $v = 1.2$  m/s;  $x_0 = 0.003$  kg/kg

С учетом требований к технологическим режимам сушки зерна были проанализированы соотношения между его температурой и влажностью, представленных кривыми  $W = f(\tau)$  и  $\Theta = f(\tau)$ , рациональные режимы которых обеспечивали высокое качество высушенного зерна тритикале. Построены температурные кривые, представляющие собой зависимость температуры зерна тритикале от его влажности  $\Theta = f(W)$  (рисунок 7).

Следует отметить, что значения температуры нагрева зерна являются в известной мере условными, так как в опытах нами фактически измерялась не температура отдельных зерен, а температура зерновой массы и в ряде случаев температура межзернового пространства. Для режимов сушки с низким влагосодержанием и высокой влагопоглощающей способностью сушильного агента установлена область соотношения температуры и влажности для зерна тритикале. В этом случае температурные кривые и соответствующие им режимы определяют допустимую область технологических свойств зерна тритикале.

Установлено, что при толщине зернового слоя 0,1 м и при температуре сушильного агента на входе в сушилку  $T = 363$  К и влагосодержании 0,002 кг/кг зависимость  $T = f(\Theta)$  не выходит за установленные пределы. График функции  $T = f(\Theta)$ , однозначно связывающий

допустимую температуру нагрева зерна с его влажностью, с достаточной степенью точности аппроксимирован уравнением

$$\Theta = \Theta_n - pW. \quad (12)$$

Уравнение (12) является важнейшим ограничением, обеспечивающим нормальный ход процесса сушки в области стандартных технологических свойств зерна. Для зерна тритикале продовольственного назначения коэффициенты ограничения (12) соответственно составляют  $\Theta_n = 335$ ,  $p = 0,65$ .

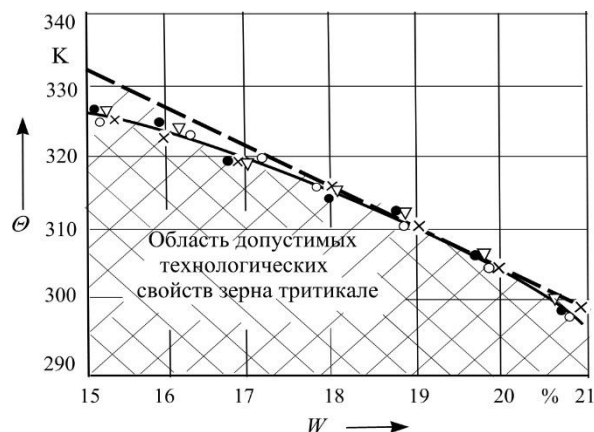


Рисунок 7. Зависимость между средней температурой нагрева и влажностью зерна: • – режим:  $T = 363$  К;  $v = 1,1$  м/с;  $x = 0,003$  кг/кг;  $W_n = 20,5\%$ ; × – режим:  $T = 373$  К;  $v = 0,7$  м/с;  $x = 0,004$  кг/кг;  $W_n = 21,0\%$ ; o – режим:  $T = 383$  К;  $v = 0,8$  м/с;  $x = 0,005$  кг/кг;  $W_n = 20,5\%$ ; ▽ – режим:  $T = 393$  К;  $v = 0,6$  м/с;  $x = 0,002$  кг/кг;  $W_n = 21,5\%$

Figure 7. Relationship between average heating temperature and grain humidity: • – mode:  $T = 363$  К;  $v = 1.1$  m/s;  $x = 0.003$  kg/kg;  $W_n = 20.5\%$ ; × – mode:  $T = 373$  К;  $v = 0.7$  m/s;  $x = 0.004$  kg/kg;  $W_n = 21.0\%$ ; o – mode:  $T = 383$  К;  $v = 0.8$  m/s;  $x = 0.005$  kg/kg;  $W_n = 20.5\%$ ; ▽ – mode:  $T = 393$  К;  $v = 0.6$  m/s;  $x = 0.002$  kg/kg;  $W_n = 21.5\%$ .

Отсюда следует, что область стандартных технологических свойств зерна тритикале при сушке ограничена координатными осями и прямой линией (12), тангенс угла наклона которой к оси  $W$  определяется коэффициентом  $p$ , и отсекающей по оси  $\Theta$  отрезок  $(\Theta_n - 273)$ . Значения этих коэффициентов могут изменяться в определенных пределах. Как показали опыты, интервалы их изменения зависят от исходного состава зерна, в частности от его начальной влажности и температуры.

Температурный режим сушки должен определяться ограничением (12), причем для интенсификации процесса необходимо двигаться по границе допустимой области термовлажностных условий.

### Заключение

Разработана эмпирическая модель кинетики конвективной сушки зерна тритикале в шахтной сушилке. Модель учитывает процесс в периоде убывающей скорости сушки, включает в свою структуру основные режимные параметры:

скорость, температуру и влагосодержание сушильного агента, толщину продуваемого слоя, учитывает возмущающее воздействие со стороны изменения начальной влажности зерна и влияние всех исследуемых факторов на влажность зерна во времени.

### Литература

- 1 Changyou L. Theoretical analysis of exergy transfer and conversion in grain drying process // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2018. V. 2018. P. 19.
- 2 Azmir J., Hou Q., Yu A. Discrete particle simulation of food grain drying in a fluidised bed // Powder Technology. 2018. V. 323. P. 238-249.
- 3 Maj G. et al. Energy and Emission Characteristics of Biowaste from the Corn Grain Drying Process // Energies. 2019. V. 12. № 22. P. 4383.
- 4 Резчиков В.А., Савченко С.В. Совершенствование сушки зерна // Хлебопродукты. 2005. № 5. С. 44-45.
- 5 Бритиков Д.А., Шевцов А.А. Энергосбережение в процессах сушки зерновых культур с использованием теплонасосных технологий. М.: ДеЛи плюс, 2012. 328 с.
- 6 Сорочинский В.Ф., Доганин А.Л. Контроль процесса сушки зерна по параметрам отработавшего агента сушки // Хлебопродукты. 2018. № 3. С. 49-53.
- 7 Изосимова Т. Н., Капица Е. В. Формирование у магистрантов знаний и практических навыков в области современных методов обработки экспериментальных данных // Перспективы развития высшей школы: материалы X Международной науч.-метод. конф. ГГАУ. 2017. С. 151-154.
- 8 Гржибовский А.М. Выбор статистического критерия для проверки гипотез // Экология человека, 2008. № 11. С. 48-55.
- 9 Лерман Е.Б., Теслова С.А. Экономические аспекты применения информационных технологий в целях снижения транспортно-логистических издержек // Вестник НГУЭУ. 2019. № 2. С. 273-286.
- 10 Катранов А.Г., Самсонова А.В. Компьютерная обработка данных экспериментальных исследований. 2005. 131 с.
- 11 Field A. Discovering statistics using SPSS. SAGE Publications, 2005. 779 p.
- 12 Спицын В.В. Источники роста и территориальное размещение высокотехнологичных отраслей в России // Вестник НГУЭУ. 2019. № 2. С. 55-70.
- 13 Asemu A. M. et al. Drying characteristics of maize grain in solar bubble dryer // Journal of Food Process Engineering. 2020. V. 43. №. 2. P. e13312.
- 14 Carrijo D.R. et al. Impacts of variable soil drying in alternate wetting and drying rice systems on yields, grain arsenic concentration and soil moisture dynamics // Field Crops Research. 2018. V. 222. P. 101-110.
- 15 Mellmann J., Weigler F., Scaar H. Research on procedural optimization and development of agricultural drying processes // Drying technology. 2019. V. 37. № 5. P. 569-578.

### References

- 1 Changyou L. Theoretical analysis of exergy transfer and conversion in grain drying process. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2018. vol. 2018. pp. 19.
- 2 Azmir J., Hou Q., Yu A. Discrete particle simulation of food grain drying in a fluidised bed. Powder Technology. 2018. vol. 323. pp. 238-249.
- 3 Maj G. et al. Energy and Emission Characteristics of Biowaste from the Corn Grain Drying Process. Energies. 2019. vol. 12. no. 22. pp. 4383.
- 4 Rezchikov V.A., Savchenko S.V. Improving grain drying. Khleboпродукты. 2005. no. 5. pp. 44-45. (in Russian).
- 5 Britikov D.A., Shevtsov A.A. Energy saving in the processes of drying grain crops using heat pump technologies. Moscow, DeLi plyus, 2012. 328 p. (in Russian).
- 6 Sorochinsky V.F., Doganin A.L. Control of the grain drying process according to the parameters of the spent drying agent. Khleboпродукты. 2018. no. 3. pp. 49-53. (in Russian).
- 7 Izosimova T.N., Kapitsa E.V. Formation of knowledge and practical skills in undergraduates in the field of modern methods of processing experimental data. Prospects for the development of higher education: materials of the X International scientific method. conf. GGAU. 2017. pp. 151-154. (in Russian).
- 8 Grzhibovsky A.M. The choice of a statistical criterion for testing hypotheses. Human Ecology, 2008. no. 11. pp. 48-55. (in Russian).
- 9 Lerman E.B., Teslova S.A. Economic aspects of the use of information technologies in order to reduce transport and logistics costs. Vestnik NSUEM. 2019. no. 2. pp. 273-286. (in Russian).
- 10 Katranov A.G., Samsonova A.V. Computer processing of experimental data. 2005. 131 p. (in Russian).
- 11 Field A. Discovering statistics using SPSS. SAGE Publications, 2005. 779 p.
- 12 Spitsyn V.V. Sources of growth and territorial distribution of high-tech industries in Russia. Vestnik NSUEM. 2019. no. 2. pp. 55-70. (in Russian).
- 13 Asemu A. M. et al. Drying characteristics of maize grain in solar bubble dryer. Journal of Food Process Engineering. 2020. vol. 43. no. 2. pp. e13312.
- 14 Carrijo D.R. et al. Impacts of variable soil drying in alternate wetting and drying rice systems on yields, grain arsenic concentration and soil moisture dynamics. Field Crops Research. 2018. vol. 222. pp. 101-110.
- 15 Mellmann J., Weigler F., Scaar H. Research on procedural optimization and development of agricultural drying processes. Drying technology. 2019. vol. 37. no. 5. pp. 569-578.




**Сведения об авторах**

**Татьяна Н. Тертычная** д.с.-х.н., профессор, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, tertychnaya@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8185-3424>

**Александр А. Шевцов** д.т.н., профессор, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, shevalol@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5745-8301>

**Сергей С. Куликов** курсовой офицер-преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, sergeifonkulikov@yandex.ru

**Вклад авторов**

**Татьяна Н. Тертычная** написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

**Александр А. Шевцов** обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты

**Сергей С. Куликов** консультация в ходе исследования

**Конфликт интересов**


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about authors**

**Tatiana N. Tertychnaya** Dr. Sci. (Agric.), professor, technology for storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina str., 1, Voronezh, 394087, Russia, tertychnaya@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8185-3424>

**Alexander A. Shevtsov** Dr. Sci. (Chem.), professor, technology of fats, processes and apparatuses of chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, shevalol@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5745-8301>

**Sergey S. Kulikov** course officer-teacher, Military training and research center of the air force «Air force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin», Old Bolsheviks str., 54a, Voronezh, 394064, Russia, sergeifonkulikov@yandex.ru

**Contribution**

**Tatiana N. Tertychnaya** wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

**Alexander A. Shevtsov** review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

**Sergey S. Kulikov** consultation during the study

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

<b>Поступила</b> 05/11/2020	<b>После редакции</b> 16/11/2020	<b>Принята в печать</b> 26/11/2020
<b>Received</b> 05/11/2020	<b>Accepted in revised</b> 16/11/2020	<b>Accepted</b> 26/11/2020