

Научная статья

УДК 66.047.75.4/5

EDN BWPBZV

<https://doi.org/10.22450/1999-6837-2025-19-1-95-105>

Кинетика сушки неподвижного слоя пшеницы

Семён Корнеевич Протасов¹, Андрей Александрович Боровик²,
Алла Мечиславовна Брайкова³

^{1,2,3} Белорусский государственный экономический университет

Минск, Республика Беларусь

¹ semenprotas@mail.ru, ² borovickandrew@yandex.by, ³ braikova_am@bseu.by

Аннотация. Конвективная сушка пшеницы в плотном неподвижном слое происходит неравномерно. Сначала просыхает слой со стороны входа агента сушки, а затем сушатся следующие за ним слои. Изменение влагосодержания зерна по высоте неподвижного слоя зависит от параметров сушильного агента (температуры, относительной влажности и скорости движения по колонне), параметров зерна (влагосодержания в начале сушки, состояния слоя и его начальной температуры) и высоты слоя. Указанные параметры также влияют на скорость сушки зерна и время его сушки. Целью работы явилось определение влияния скорости сушильного агента и начального влагосодержания зерна на скорость и время сушки. В статье приведены результаты исследования конвективной сушки неподвижного слоя пшеницы. Для исследований кинетики сушки пшеницы применен весовой метод. Его сущность заключается в том, что материал вместе с сушилкой периодически отсоединяли от непрерывно работающей установки и взвешивали. Это позволяло определять влагосодержание зерна в момент взвешивания. Изменение влагосодержания пшеницы во времени всего процесса сушки позволяет получить кинетические кривые сушки. Получены графические зависимости времени сушки и скорости сушки в зависимости от начального влагосодержания и скорости сушильного агента. Приведены формулы для расчета времени сушки и максимальной скорости сушки. Установлено, что увеличение скорости сушильного агента незначительно увеличивает скорость и сокращает время сушки пшеницы. Увеличение скорости сушильного агента в 3,5 раза уменьшает время сушки в 1,57 раза. Снижение начального влагосодержания пшеницы в 1,46 раза уменьшает время сушки в 2 раза.

Ключевые слова: сушка, пшеница, неподвижный слой, влагосодержание, время сушки, скорость сушки

Для цитирования: Протасов С. К., Боровик А. А., Брайкова А. М. Кинетика сушки неподвижного слоя пшеницы // Дальневосточный аграрный вестник. 2025. Том 19. № 1. С. 95–105. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2025-19-1-95-105>.

Original article

Kinetics of wheat fixed bed drying

Semyon K. Protasov¹, Andrey A. Borovik², Alla M. Braykova³

^{1,2,3} Belarusian State University of Economics, Minsk, Republic of Belarus

¹ semenprotas@mail.ru, ² borovickandrew@yandex.by, ³ braikova_am@bseu.by

Abstract. Convective drying of wheat in a dense fixed bed occurs unevenly. First, the layer on the side of the drying agent inlet dries, and then the layers following it are dried. Changes in grain moisture content along the height of the fixed bed depend on the drying agent parameters (temperature, relative humidity and speed of movement along the column), grain parameters (moisture content at the beginning of drying, layer condition and its initial temperature) and the layer height. These parameters also affect the grain drying rate and drying time. The aim of the

work is to determine the effect of the drying agent speed and the initial moisture content of the grain on the drying rate and time. The article presents the results of a study of convective drying of a fixed layer of wheat. A gravimetric method was used to study the kinetics of wheat drying. The essence of the method was that the material together with the dryer was periodically disconnected from the continuously operating unit and weighed. This made it possible to determine the moisture content of the grain at the time of weighing. The change in the moisture content of wheat over time during the entire drying process allows us to obtain kinetic drying curves. Graphic dependences of the drying time and drying rate depending on the initial moisture content and the drying agent speed are obtained. Formulas for calculating the drying time and maximum drying speed are given. It has been established that an increase in the drying agent speed slightly increases the drying rate and reduces the drying time of wheat. Increasing the drying agent speed by 3.5 times reduces the drying time by 1.57 times. Reducing the initial moisture content of wheat by 1.46 times reduces the drying time by 2 times.

Keywords: drying, wheat, fixed bed, moisture content, drying time, drying speed

For citation: Protasov S. K., Borovik A. A., Braykova A. M. Kinetics of wheat fixed bed drying. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik*. 2025;19;1:95–105. (in Russ.). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-19-1-95-105>.

Введение. Размеры оборудования и его производительность зависят от важнейшего технологического параметра процесса сушки – времени сушки. Время сушки зерна зависит от сорта пшеницы, ее начальной влажности, температуры и скорости движения теплоносителя. Известны экспериментальные исследования кинетики сушки пшеницы различных сортов [1–9].

Чтобы определить основные закономерности кинетики сушки, необходимо проводить процесс при постоянных параметрах сушильного агента (температура и относительная влажность) в течение всего процесса сушки. Конвективная сушка пшеницы в плотном неподвижном слое большой толщины происходит неравномерно. Вначале просыхает нижний слой со стороны входа агента сушки, а затем сушатся следующие по высоте за ним слои.

Целью работы явилось определение влияния скорости сушильного агента и начального влагосодержания зерна на кинетику конвективной сушки неподвижного слоя зерна пшеницы, а также установление скорости сушки и времени сушки до равновесного влагосодержания зерна при условиях его хранения.

Материалы и методика исследований. Объектом исследований стало зерно пшеницы сорта Батько. Исследования проведены весовым методом [10, 11].

Для исследования кинетики конвективной сушки зерна весовым методом разработана лабораторная установка (рис. 1).

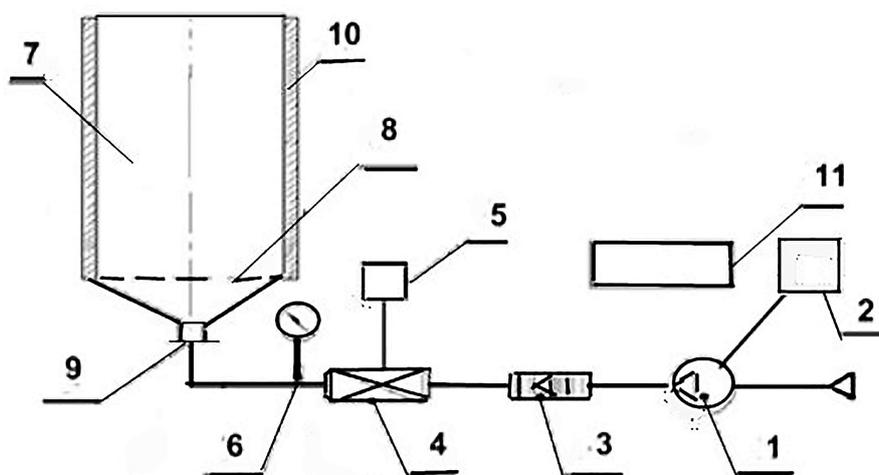
Принцип работы установки. Атмосферный воздух воздуходувкой 1 подается в электрический калорифер 4. Расход воздуха регулируется автотрансформатором 2 и измеряется расходомером 3. В калорифере воздух нагревается до необходимой температуры, которая контролируется термометром 6 и регулируется с помощью лабораторного автотрансформатора 5. Нагретый воздух (сушильный агент) поступает снизу в сушилку с влажным зерном 7, проходит через слой влажного зерна, удаляет влагу из него, а затем выходит в атмосферу.

Перед началом исследований определяют влагосодержание влажного зерна (начальное влагосодержание) (U_n). Для этого из партии зерна для исследований выбирают три навески небольшой массы (порядка 5 грамм) и определяют их начальные массы (m_n) с точностью до 0,01 г.

Навески помещают в сушильный шкаф и сушат при температуре 100 °С. Периодически (через 5 минут) их достают из шкафа и взвешивают. Когда масса каждой навески не меняется в течение трех последовательных взвешиваний, то ее принимают как массу сухого зерна ($m_{сух}$). Окончательную массу сухого зерна принимают как среднее арифметическое трех навесок.

Начальное влагосодержание влажного зерна рассчитывают по формуле (1):

$$U_n = \frac{m_n - m_{сух}}{m_{сух}} \quad (1)$$



1 – воздуходувка; 2 – лабораторный автотрансформатор; 3 – расходомер воздуха; 4 – электрический калорифер; 5 – лабораторный автотрансформатор; 6 – термометр; 7 – сушилка; 8 – опорная решетка; 9 – разъемное устройство; 10 – теплоизоляция; 11 – весы
 1 – air blower; 2 – laboratory autotransformer; 3 – air flow meter; 4 – electric heater; 5 – laboratory autotransformer; 6 – thermometer; 7 – dryer; 8 – support grid; 9 – connector device; 10 – thermal insulation; 11 – scales

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки
Figure 1 – Laboratory setup diagram

Последовательность проведения исследований. Включаем воздуходувку 1 и с помощью автотрансформатора 2 устанавливаем необходимый расход воздуха по показаниям прибора 3. Включаем электрический калорифер 4 и устанавливаем необходимую температуру воздуха с помощью автотрансформатора 5 и термометра 6. Определяем массу сушилки ($M_{суш}$) на весах 11 с точностью 0,01 г. Заполняем сушилку влажным зерном с влагосодержанием U_n . Измеряем высоту слоя зерна и определяем общую массу сушилки с зерном ($M_{общ}$).

Тогда начальную массу влажного зерна для исследований рассчитываем по формуле (2), а массу сухой части зерна – по формуле (3):

$$M_n = M_{общ} - M_{суш} \quad (2)$$

$$M_{сух} = \frac{M_n}{U_n + 1} \quad (3)$$

Устанавливаем необходимые расход и температуру воздуха. Сушилку с влажным зерном помещаем в разъемное устройство 9 и фиксируем время начала сушки. Через несколько минут сушилку отсоединяем от разъемного устройства и

взвешиваем, определив ее общую массу, а затем быстро устанавливаем ее на прежнее место. При необходимости корректируем расход и температуру воздуха.

Влагосодержание зерна в момент времени взвешивания рассчитываем по формуле (4):

$$U_n = M_n - M_{сух} \quad (4)$$

где U_n – влагосодержание зерна в n -й момент времени, кг/кг;

M_n ($M_{общ} - M_{суш}$) – масса влажного зерна в n -й момент времени, кг;

$M_{сух}$ – масса сухой части зерна, кг.

Следующие измерения влагосодержания зерна проводим через выбранные заранее промежутки времени. Заканчиваем опыт, когда влагосодержание зерна достигнет равновесного значения (0,12 кг/кг), соответствующего условиям длительного хранения зерна пшеницы [4].

При анализе кинетики сушки следует учитывать, что весовой метод позволяет определить среднее по объему влагосодержание зерна (среднее по высоте слоя). По полученным значениям влагосодержания зерна и соответствующим им време-

нам сушки строим графическую зависимость влагосодержания зерна от времени сушки (кривую сушки).

С помощью кривой сушки определяем продолжительность (время) сушки зерна до равновесного состояния 0,12 кг/кг. Графическим дифференцированием кривой сушки получаем изменение скорости сушки в зависимости от влагосодержания зерна (кривую скорости сушки).

Результаты исследований и их обсуждение. Ранее авторами проведены исследования влияния температуры сушильного агента на кинетику конвективной сушки неподвижного слоя зерна пшеницы сорта Батько [11].

Влияние скорости сушильного агента (нагретого воздуха) проводили при температуре воздуха на входе в сушилку 70 °С, начальном влагосодержании 0,212 кг/кг и высоте слоя зерна 100 мм. Скорость воздуха изменяли от 0,2 до 0,7 м/с.

На рисунке 2 показаны кинетические кривые сушки для зерен пшеницы при пяти скоростях нагретого воздуха. Можно видеть, что с увеличением скорости сушильного агента время сушки уменьшается.

С помощью кривых сушки определено время сушки пшеницы до конечного влагосодержания 0,12 кг/кг, что на 0,02 кг/кг ниже кондиционной влажно-

сти зерна для обеспечения длительного хранения [4]. По указанным данным построена зависимость времени сушки пшеницы от скорости воздуха (рис. 3). Расчеты показывают, что с увеличением скорости воздуха в 3,5 раза время сушки уменьшается всего в 1,57 раза.

В результате математического анализа данных (рис. 3), выполненного средствами MS Excel, получена следующая линейная зависимость для определения времени сушки пшеницы при скоростях воздуха от 0,2 до 0,7 м/с:

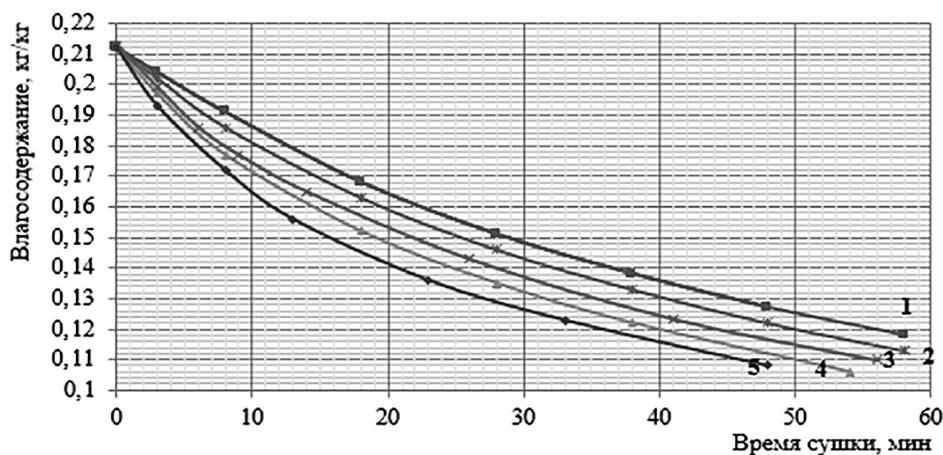
$$\tau = -37,979 \cdot \omega + 61,979 \quad (5)$$

где τ – время сушки, мин;
 ω – скорость воздуха, м/с.

Коэффициент детерминации зависимости (5) составил 0,9955.

Кривые сушки (рис. 2) обработаны с использованием методики, представленной в работе [11]. Таким образом, получены кривые скорости сушки для тех же скоростей воздуха (рис. 4).

Анализ кривых (рис. 2 и 4) показывает, что при всех скоростях воздуха скорость сушки в течение 3,5 минут резко возрастает до своего максимального значения. В это время идет прогрев зерен пшеницы, удаляется механически связан-



1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,43; 4 – 0,55; 5 – 0,7 м/с

1 – 0.2; 2 – 0.3; 3 – 0.43; 4 – 0.55; 5 – 0.7 m/s

Рисунок 2 – Зависимости влагосодержания зерен пшеницы от времени сушки (кривые сушки) для скоростей воздуха

Figure 2 – Dependence of moisture content of wheat grains on drying time (drying curves) for air speeds

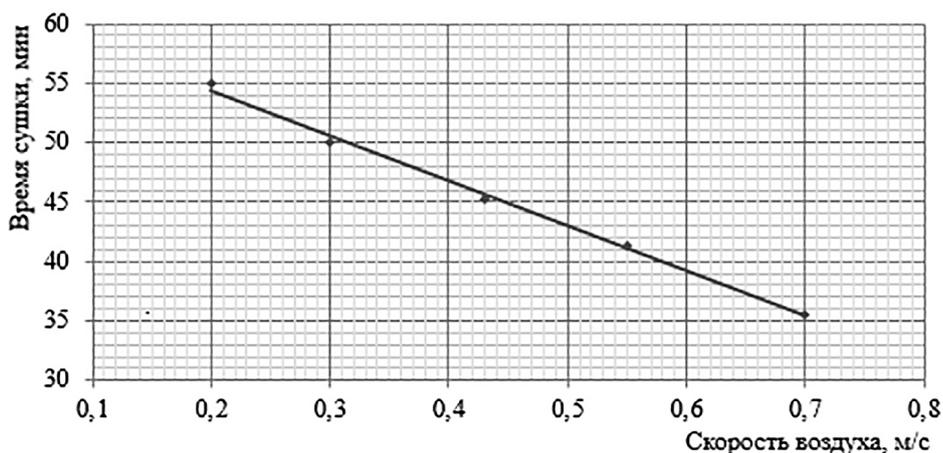
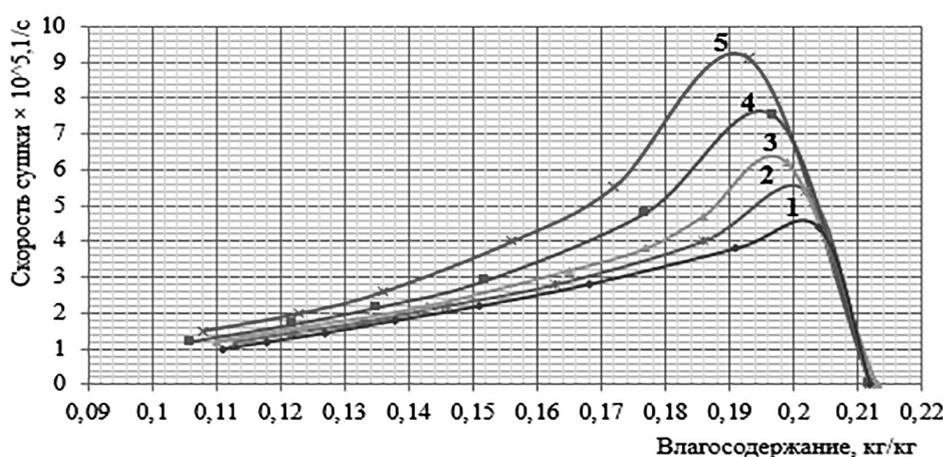


Рисунок 3 – Зависимость времени сушки зерен пшеницы от скорости воздуха
Figure 3 – Dependence of wheat grain drying time on air speed



1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,43; 4 – 0,55; 5 – 0,7 м/с
 1 – 0.2; 2 – 0.3; 3 – 0.43; 4 – 0.55; 5 – 0.7 m/s

Рисунок 4 – Кривые скорости сушки зерен пшеницы для различных скоростей воздуха
Figure 4 – Wheat grain drying rate curves for different air speeds

ная влага, покрывающая поверхность зерен. Затем сразу наступает второй период падающей скорости сушки. Для него характерно удаление внутренней влаги зерен. По мере удаления внутренней влаги давление водяного пара над поверхностью зерен уменьшается, приближаясь в пределе к величине парциального давления паров воды в сушильном агенте. Следовательно, движущая сила процесса сушки уменьшается, приближаясь к нулю, и скорость процесса асимптотически приближается к нулю.

Таким образом, при сушке пшеницы после прогрева материала первый период сушки практически не наблюдается,

а процесс протекает во втором периоде сушки (рис. 4).

Следует отметить и то, что значительное увеличение скорости движения сушильного агента не приводит к столь же резкому снижению времени сушки (рис. 2). Это обусловлено тем, что большую часть времени сушка материала происходит во втором периоде, где влага диффундирует из глубины зерна к его поверхности. Поэтому движение сушильного агента практически не влияет на скорость внутренней диффузии, а, значит, и время сушки.

С помощью рисунка 4 определены максимальные скорости сушки для всех исследуемых скоростей воздуха. Постро-

ена зависимость максимальной скорости сушки от скорости воздуха (рис. 5). Чем выше скорость сушильного агента, тем больше максимальная скорость сушки пшеницы. При увеличении скорости воздуха в 3,5 раза максимальная скорость сушки увеличивается в 2 раза.

В результате математического анализа данных (рис. 5), выполненного средствами MS Excel, получена линейная зависимость для определения максимальной скорости сушки пшеницы при скоростях воздуха от 0,2 до 0,7 м/с:

$$N_{\text{макс}} = (9,3532 \cdot \omega + 2,532) \cdot 10^{-5} \quad (6)$$

где $N_{\text{макс}}$ – максимальная скорость сушки, 1/с;
 ω – скорость воздуха, м/с.

Коэффициент детерминации зависимости (6) составляет 0,9968.

Влияние начального влагосодержания зерен пшеницы на кинетику и время сушки проводили при постоянной температуре воздуха на входе в сушилку 70 °С, скорости воздуха 0,7 м/с и высоте слоя 100 мм. Опыты проводили при влагосодержании пшеницы, составляющей 0,19; 0,216; 0,25 и 0,277 кг/кг.

Для получения необходимого для проведения опытов начального влагосодержания исходное зерно замачивали водой. Для опытов отбирали необходимое количество исходного зерна, определяли его массу (M_3) и по методике, представленной в работе [11], находили его вла-

госодержание ($U_{\text{исх}}$). Затем рассчитывали массу сухой части исходного зерна ($M_{\text{сух}}$):

$$M_{\text{сух}} = \frac{M_3}{1 + U_{\text{исх}}} \quad (7)$$

Чтобы получить необходимое для конкретного опыта начальное влагосодержание ($U_{\text{нач}}$), зерно с влагосодержанием ($U_{\text{исх}}$) и массой (M_3) замачивали водой. Количество добавляемой воды рассчитывали по формуле (8):

$$M_{\text{вод.д}} = \frac{(U_{\text{нач}} - U_{\text{исх}}) \cdot M_3}{1 + U_{\text{исх}}} \quad (8)$$

где $M_{\text{вод.д}}$ – масса добавленной воды, г;
 $U_{\text{нач}}$ – необходимое для опыта начальное влагосодержание зерна, кг/кг;
 $U_{\text{исх}}$ – влагосодержание зерна, которое берется для замачивания, кг/кг;
 M_3 – масса зерна, взятого для исследований, г.

Затем замоченное зерно помещали в герметичную емкость и перемешивали. Для равномерного распределения влаги зерно выдерживали в течение шести суток, периодически перемешивая. После выдержки зерно опять взвешивали и получали конечную массу зерна ($M_{3,\text{кон}}$), с помощью которой определяли действительное начальное влагосодержание зерна:

$$U_{\text{нач}}^{\text{д}} = \frac{M_{3,\text{кон}}}{M_{\text{сух}}} - 1 \quad (9)$$

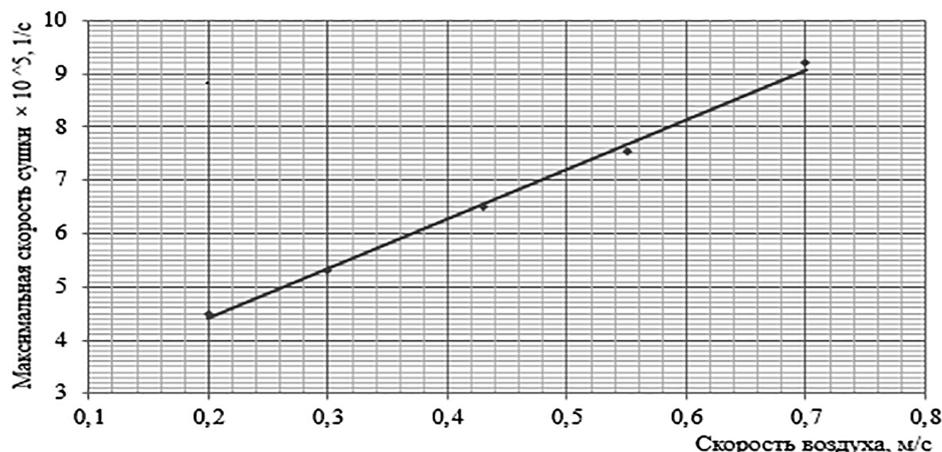


Рисунок 5 – Зависимость максимальной скорости сушки зерен пшеницы от скорости воздуха

Figure 5 – Maximum wheat grain drying rate as a function of air speed

Влияние начального влагосодержания пшеницы на кинетику сушки представлено в виде кривых сушки (рис. 6). Как видно, с увеличением влагосодержания продолжительность сушки пшеницы увеличивается.

С помощью кривых сушки определено время сушки зерен до конечного влагосодержания 0,12 кг/кг для каждого начального влагосодержания. По полученным данным построена графическая зависимость времени сушки от начального влагосодержания (рис. 7). Согласно расчету, при увеличении начального влагосодержания в 1,46 раза время сушки пшеницы увеличивается в 2 раза.

В результате математического анализа данных (рис. 7), выполненного средствами MS Excel, получена линейная зависимость для определения времени сушки пшеницы при изменении начального влагосодержания от 0,19 до 0,277 кг/кг:

$$\tau = 259U_{\text{нач}} - 26,813 \quad (10)$$

где τ – время сушки зерна, мин;
 $U_{\text{нач}}$ – начальное влагосодержание зерна, кг/кг.

Коэффициент детерминации зависимости (10) равен 0,9955. С использованием методики, представленной в работе [11], обработаны кривые сушки (рис. 6) и полу-

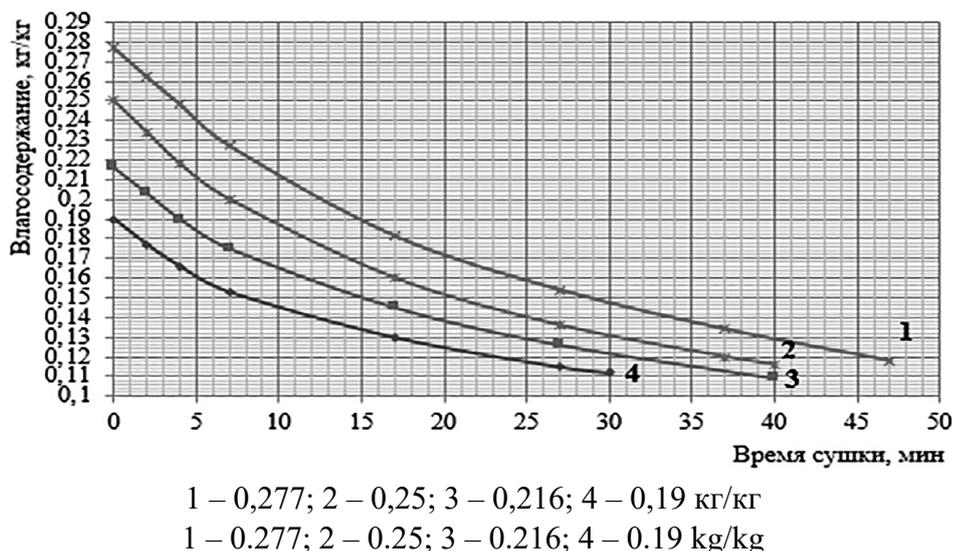


Рисунок 6 – Кривые сушки при начальном влагосодержании зерен пшеницы
 Figure 6 – Drying curves at initial moisture content of wheat grains

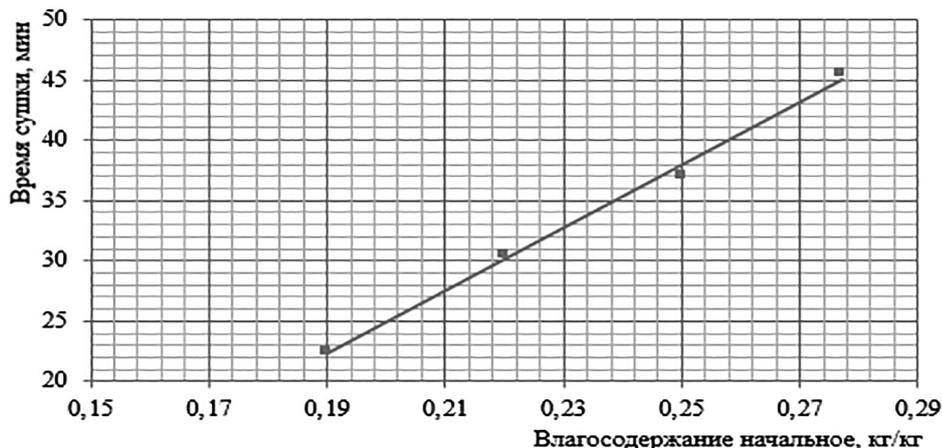


Рисунок 7 – Зависимость времени сушки зерен пшеницы от начального влагосодержания
 Figure 7 – Dependence of the wheat grain drying time on the initial moisture content

чены кривые скорости сушки при тех же значениях начального влагосодержания. Они показаны на рисунке 8.

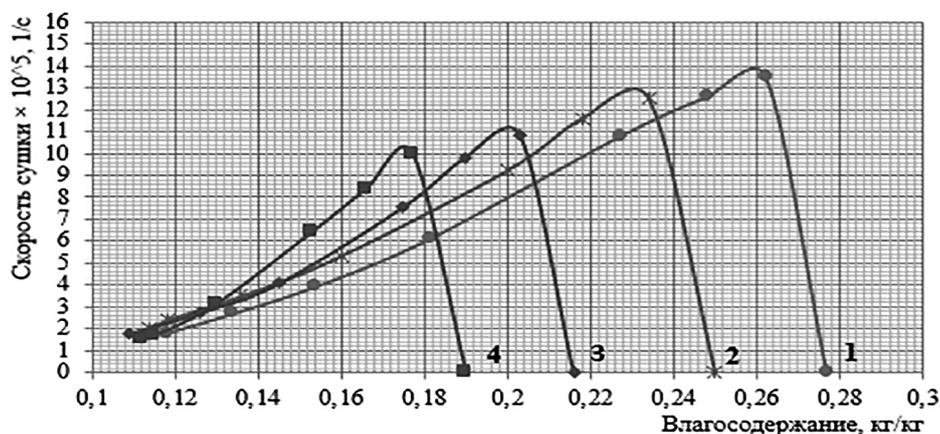
Анализ кривых скорости сушки позволяет сделать вывод, что при всех значениях начального влагосодержания скорость сушки в течение двух минут резко возрастает, достигая своего максимального значения. Резкое возрастание скорости сушки обусловлено тем, что в периоде прогрева испаряется свободная влага с поверхности материала и наименее связанная влага, находящаяся вблизи поверхности зерен. После прогрева следует плавное снижение скорости сушки до

минимального значения, то есть наступает второй период сушки.

С помощью рисунка 8 определены максимальные скорости сушки для исследуемых значений начального влагосодержания. На рисунке 9 приведена зависимость максимальной скорости сушки от начального влагосодержания зерен.

Из графика видно, что при увеличении начального влагосодержания в 1,46 раза максимальная скорость сушки увеличивается в 1,35 раза.

В результате математического анализа данных (рис. 9), выполненного средствами MS Excel, получена линейная зави-



1 – 0,277; 2 – 0,25; 3 – 0,216; 4 – 0,19 кг/кг

1 – 0,277; 2 – 0,25; 3 – 0,216; 4 – 0,19 kg/kg

Рисунок 8 – Кривые скорости сушки зерен пшеницы при начальном влагосодержании
Figure 8 – Curves of the wheat grain drying rate at the initial moisture content

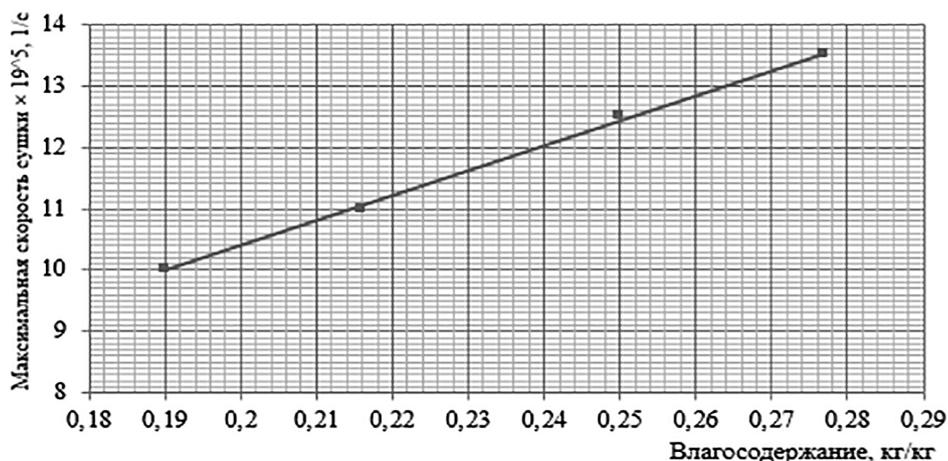


Рисунок 9 – Зависимость максимальной скорости сушки пшеницы от начального влагосодержания

Figure 9 – Dependence of the maximum drying rate of wheat on the initial moisture content

симось для определения максимальной скорости сушки пшеницы при изменении начального влагосодержания от 0,19 до 0,277 кг/кг:

$$N_{\text{макс}} = (40,743 \cdot U_{\text{нач}} + 2,2468) \cdot 10^{-5} \quad (11)$$

где $N_{\text{макс}}$ – максимальная скорость сушки зерна, 1/с;

$U_{\text{нач}}$ – начальное влагосодержание зерна, кг/кг.

Коэффициент детерминации зависимости (11) составляет 0,9989.

Заключение. Получены кинетические кривые сушки и кривые скорости сушки для скоростей сушильного агента от 0,2 до 0,7 м/с. Определено время сушки пшеницы при этих скоростях. Установлено, что при увеличении скорости сушиль-

ного агента в 3,5 раза время сушки пшеницы уменьшается лишь в 1,57 раза.

Получены эмпирические формулы для расчета времени сушки и максимальной скорости сушки в зависимости от скорости сушильного агента.

Определено влияние начального влагосодержания зерен пшеницы на кривые сушки и кривые скорости сушки. Установлено, что с увеличением начального влагосодержания зерен пшеницы от 0,19 до 0,277 кг/кг (в 1,46 раза) время сушки увеличивается в 2 раза, при этом максимальная скорость сушки увеличивается только в 1,35 раза.

Получены эмпирические формулы для расчета времени сушки и максимальной скорости сушки в зависимости начального влагосодержания.

Список источников

1. Богданов С. И., Дарманян А. П., Маркин М. А. Исследование и математическое моделирование кинетики сушки зерна озимой пшеницы // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2022. № 2 (66). С. 439–448. doi: 10.32786/2071-9485-2022-02-54. EDN JLHWWI.
2. Васильев А. Н., Васильев А. А., Цымбал А. А. Моделирование СВЧ-конвективной сушки зерна при движении его в активной зоне // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 3 (32). С. 319–329. EDN TILMME.
3. Голованчиков А. Б., Меренцов Н. А., Балашов В. А. Оценка влияния обратного перемешивания сушильного агента на технологические и геометрические параметры барабанной сушилки // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 5. С. 50–56. EDN ZXYNBX.
4. Разворотнев А. С., Гавриченко Ю. Д., Кечкин И. А. Режимы хранения и вентилирования зерна пшеницы в металлических силосах большой вместимости // Хлебопродукты. 2017. № 11. С. 57–59. EDN ZQOCON.
5. Зерновые культуры. Выращивание, уборка, доработка и использование / под ред. Д. Шпаара. М. : ДЛВ Агродело, 2016.
6. Бузоверов С. Ю., Лобанов В. И., Протасов Н. С. Влияние степени увлажнения зерна в процессе гидротермической обработки на качество и выход муки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 1 (159). С. 172–176. EDN YNHDHD.
7. Тертычная Т. Н., Шевцов А. А., Куликов С. С. Экспериментально-статистическое исследование процесса сушки зерна тритикале при противоточно-прямоточном продувании зернового слоя // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 4 (86). С. 38–46. doi: 10.20914/2310-1202-2020-4-38-46. EDN RXIKNP.
8. Воронова Е. В., Павлов И. О., Гладких Т. В. Результат моделирования процесса сушки дисперсных сред // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 3 (67). С. 207–211. EDN PYPFKZ.
9. Загоруйко М. Г., Павлов С. А. Исследование кинетики досушки зерна на складе // Аграрный научный журнал. 2020. № 12. С. 87–89. doi: 10.28983/asj.y2020i12pp87-89. EDN SIDKZL.

10. Протасов С. К., Боровик А. А., Брайкова А. М. Новая весовая методика исследования кинетики конвективной сушки // Химическая промышленность. 2021. № 3 (98). С. 148–152. EDN DCWJYD.

11. Протасов С. К., Боровик А. А., Брайкова А. М. Сушка неподвижного слоя пшеницы весовым методом // Мичуринский агрономический вестник. 2024. № 2. С. 14–19.

References

1. Bogdanov S. I., Darmanyany A. P., Markin M. A. Research and mathematical modeling of the kinetics of drying winter wheat grain. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa*, 2022;2(66):439–448. doi: 10.32786/2071-9485-2022-02-54. EDN JLHWWI (in Russ.).

2. Vasiliev A. N., Vasiliev A. A., Tsymbal A. A. Modeling of microwave convective drying of grain during its movement in the active zone. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve*, 2019;3(32): 319–329. EDN TILMME (in Russ.).

3. Golovanchikov A. B., Merentsov N. A., Balashov V. A. Evaluation of the influence of reverse mixing of the drying agent on the technological and geometric characteristics of a drum dryer. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2017;5:50–56. EDN ZXYNBX (in Russ.).

4. Razvorotnev A. S., Gavrichenkov Yu. D., Kechkin I. A. Storage and ventilation modes of wheat grain in large-capacity metal silos. *Khleboпродукты*, 2017;11:57–59. EDN ZQOCON (in Russ.).

5. Shpaar D (Eds.). *Grain crops. Growing, harvesting, processing and use*, Moscow, DLV Agrodelo, 2016 (in Russ.).

6. Buzoverov S. Yu., Lobanov V. I., Protasov N. S. Influence of the degree of grain moisture during hydrothermal treatment on the quality and yield of flour. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018;1(159):172–176. EDN YNHDHD (in Russ.).

7. Tertychnaya T. N., Shevtsov A. A., Kulikov S. S. Experimental and statistical study of the process of drying triticale grain with counter-current-direct-flow blowing of the grain layer. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii*, 2020;82;4(86): 38–46. doi: 10.20914/2310-1202-2020-4-38-46. EDN RXIKNP (in Russ.).

8. Voronova E. V., Pavlov I. O., Gladkikh T. V. Result of modeling the drying process of dispersed media. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012;3 (67):207–211. EDN PYPFKZ (in Russ.).

9. Zagoruiko M. G., Pavlov S. A. Study of the kinetics of grain drying in a warehouse. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*, 2020;12:87–89. doi: 10.28983/asj.y2020i12pp87-89. EDN SIDKZL (in Russ.).

10. Protasov S. K., Borovik A. A., Braykova A. M. New gravimetric method for studying the kinetics of convective drying. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2021;3(98):148–152. EDN DCWJYD (in Russ.).

11. Protasov S. K., Borovik A. A., Braykova A. M. Drying a fixed layer of wheat by the gravimetric method. *Michurinskii agronomicheskii vestnik*, 2024;2:14–19 (in Russ.).

© Протасов С. К., Боровик А. А., Брайкова А. М., 2025

Статья поступила в редакцию 20.02.2025; одобрена после рецензирования 12.03.2025; принята к публикации 14.03.2025.

The article was submitted 20.02.2025; approved after reviewing 12.03.2025; accepted for publication 14.03.2025.

Информация об авторах

Протасов Семен Корнеевич, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет, Author ID: 844841, semenprotas@mail.ru;

Боровик Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет, Author ID: 802048, borovickandrew@yandex.by;

Брайкова Алла Мечиславовна, кандидат химических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет, Author ID: 849333, braikova_am@bseu.by

Information about the authors

Semyon K. Protasov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarusian State University of Economics, Author ID: 844841, semenprotas@mail.ru;

Andrey A. Borovik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarusian State University of Economics, Author ID: 802048, borovickandrew@yandex.by;

Alla M. Braykova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Belarusian State University of Economics, Author ID: 849333, braikova_am@bseu.by

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.