

УДК 66. 047.75.4/5

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ ЗЕРНА ЯЧМЕНЯ

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

Белорусский государственный экономический университет

Дана краткая характеристика весового метода для исследования кинетики конвективной сушки зерна ячменя. Приведена схема установки для проведения сушки неподвижного слоя зерна весовым методом. Получены кривые сушки и кривые скорости сушки для зерен ячменя при различных скоростях сушильного агента. Приведены формулы для расчета времени сушки и максимальной скорости сушки в зависимости от скорости сушильного агента.

Ключевые слова: конвективная сушка, ячмень, время сушки, скорость сушки, кинетические кривые.

A STUDY OF BARLEY GRAIN DRYING KINETICS

Protasov S.K., Borovik A.A., Braykova A.M.

Belarusian State University of Economics

This article briefly describes the gravimetric method for studying the kinetics of convective grain drying. A diagram of a setup for fixed-bed barley grain drying using the gravimetric method is presented. Drying curves and drying rate curves are obtained for barley grains at various drying agent speeds. Formulas are provided for calculating drying time and maximum drying rate depending on drying agent speed.

Key words: convective drying, barley, drying time, drying rate, kinetic curves.

Исследования кинетики сушки ячменя проводили весовым методом. Метод разработан и опробован при исследовании сушки пуха рогоза и зерна пшеницы [1-4]. Сущность метода заключается в следующем. Во время сушки влажное зерно ячменя вместе с сушилкой периодически взвешивается. Рассчитывается количество удаленной влаги из зерна за период времени между соответствующими взвешиваниями. По массе удаленной влаги и определённой предварительно массе сухой части исследуемого зерна, определяется его влагосодержание. Многократное взвешивание в разные промежутки времени позволило получить кинетическую кривую сушки.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на лабораторной установке (рисунок 1).

Принцип работы установки. Атмосферный воздух воздуходувкой 1 подаётся 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 через разъемное устройство 9 и опорную решетку 8 в сушилку 7, проходит через слой влажного зерна, удаляет влагу из него, а затем выходит в атмосферу.

В начале исследований определяют влагосодержание влажного зерна ячменя (начальное влагосодержание) U_n . С этой целью из партии влажного зерна 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°C. Периодически (через 5 минут) навески достают из шкафа и взвешивают.

Когда масса каждой навески не меняется в течение трех последовательных взвешиваний, то ее принимают как массу сухого зерна $m_{\text{сух}}$. Окончательную массу сухого зерна принимают как среднее арифметическое трех навесок. Начальное влагосодержание влажного зерна рассчитывают по формуле:

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

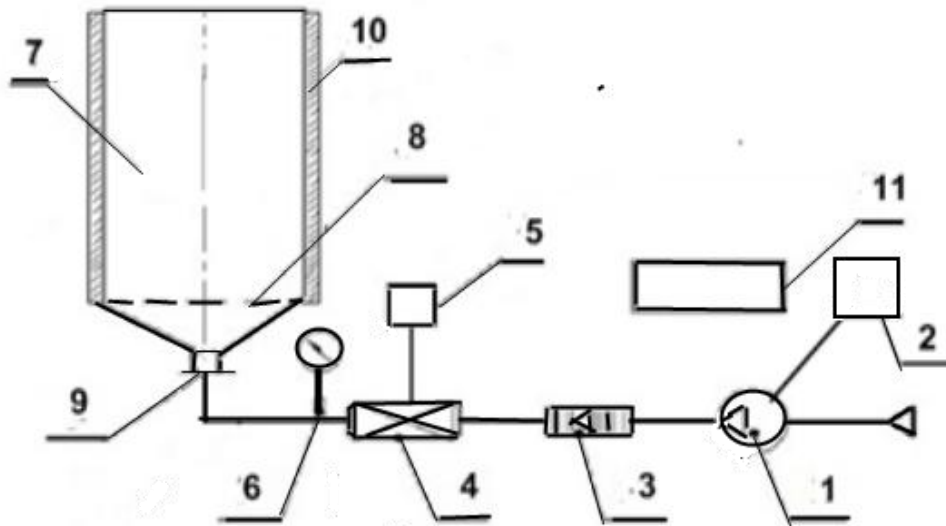


Рисунок 1. Схема лабораторной установки. 1-воздушодувка; 2-лабораторный автотрансформатор; 3- расходомер воздуха; 4-электрический калорифер; 5-лабораторный автотрансформатор; 6-термометр; 7-сушилка; 8-опорная решетка; 9-разъемное устройство; 10 – теплоизоляция; 11-весы.

Последовательность проведения исследований. Включить воздушодувку 1 и с помощью автотрансформатора 2 установить необходимый расход воздуха по показаниям расходомера 3. Включить электрический калорифер 4 и установить необходимую температуру воздуха с помощью автотрансформатора 5 и термометра 6. Определить массу сушилки $M_{\text{суш}}$ на весах 11 с точностью 0.01 г. Заполнить сушилку влажным зерном с влагосодержанием U_n . Измерить высоту слоя зерна и определить общую массу сушилки и зерна $M_{\text{общ}}$. Рассчитать начальную массу влажного зерна для исследований:

$$M_n = M_{\text{общ}} - M_{\text{суш}} \quad (2)$$

Определить массу сухой части зерна для исследований:

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

Затем при постоянном расходе и температуре воздуха, установить сушилку с влажным зерном в разъемное устройство 9 и зафиксировать время начала сушки. Через 3 минуты сушилку отсоединить от разъемного устройства, определить общую массу $M_{\text{общ}}$, и быстро установить её на рабочее место. При необходимости, подкорректировать расход и температуру воздуха. Последующие два взвешивания производить так же через 3 минуты. Остальные временные интервалы между измерениями массы сушилки можно увеличить в зависимости от условий сушки.

Влагосодержание зерна в момент взвешивания рассчитать по формуле:

$$U_n = M_n - M_{\text{сух}} / M_{\text{сух}} \quad (4)$$

где U_n – влагосодержание зерна в n -й момент времени, кг/кг; $M_n = M_{n \text{ общ}} - M_{\text{сух}}$ – масса влажного зерна в n -й момент времени, кг; $M_{n \text{ общ}}$ – общая масса сушилки и зерна в n -й момент времени, кг. $M_{\text{сух}}$ – масса сухой части зерна, кг.

Закончить сушку, когда влагосодержание зерна достигнет равновесного значения 0,12 кг/кг, которое соответствует условиям дальнейшего хранения. По полученным данным построить графическую зависимость влагосодержания материала от времени сушки (кривую сушки). С помощью кривой сушки определить продолжительность (время) сушки зерна до равновесного состояния. Графическим интегрированием кривой сушки получить изменение скорости сушки в зависимости от влагосодержания материала (кривую скорости сушки).

Результаты и их обсуждение

Исследования проводили с зерном ячменя сорта Мустанг. Высота слоя зерна – 100 мм. Скорость воздуха в сушилке изменяли от 0,25 м/с до 0,6 м/с. Начальное влагосодержание ячменя – 0,234 кг/кг. Температуру воздуха на входе в сушилку поддерживали 50 °С.

На рисунке 2 приведены кривые сушки, при различных скоростях воздуха.

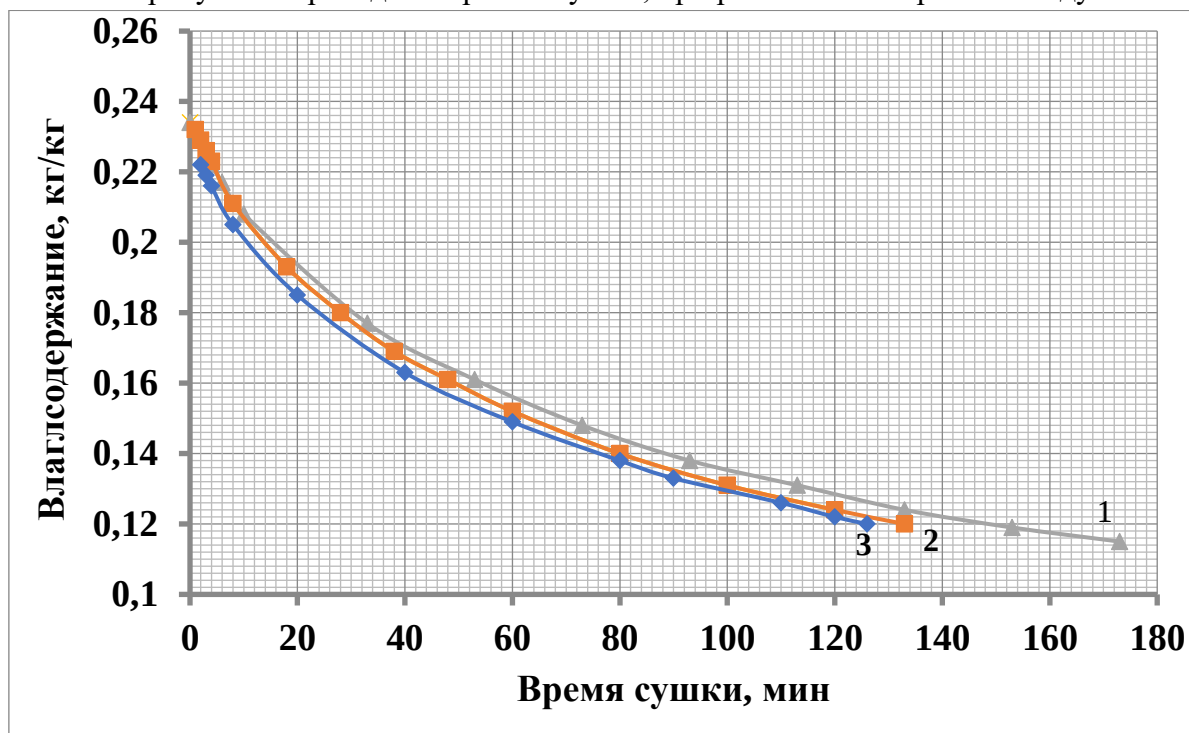


Рисунок 2. Кривые сушки зерна ячменя в зависимости от скорости воздуха: 0,25, 0,4, 0,6 м/с.

На рисунке 2 видно, что с увеличением скорости сушильного агента (воздуха) время сушки зерна незначительно уменьшается.

Используя кривые сушки (рисунок 2), было определено время сушки зерна ячменя до равновесного влагосодержания 0,12 кг/кг для всех исследуемых скоростей воздуха. Построена графическая зависимость времени сушки от скорости воздуха (рисунок 3).

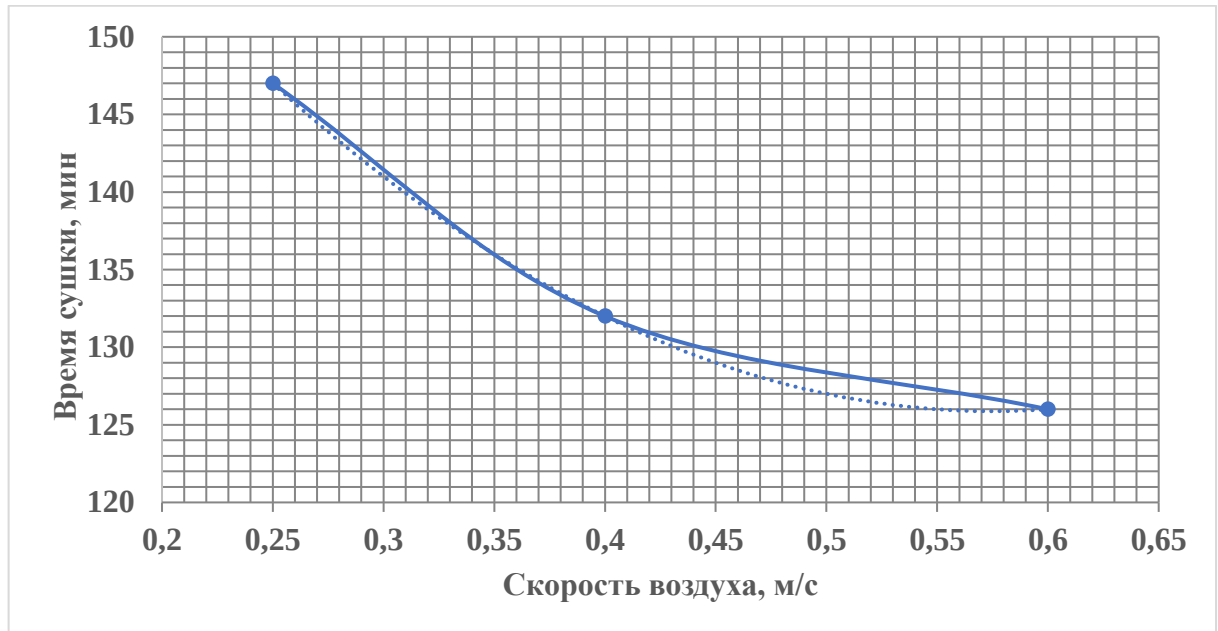


Рисунок 3. Зависимость времени сушки зерна ячменя от скорости воздуха (сушильного агента).

Анализ этой зависимости показывает, что увеличение скорости в 2,4 раза позволяет уменьшить время сушки всего в 1,18 раза.

В результате математического анализа данных (рисунок 3), выполненного средствами MS Excel, получена следующая зависимость для определения времени сушки ячменя при скоростях воздуха от 0,25 до 0,6 м/с:

$$\tau = 200\omega^2 - 230\omega + 192, \quad (5)$$

где τ – время сушки, мин; ω – скорость сушильного агента (воздуха), м/с. Коэффициент детерминации зависимости (5) $R^2=1$.

С помощью графического интегрирования кривых сушки (рисунок 2) построены кривые скорости сушки при скоростях воздуха 0,25, 0,4, 0,6 м/с (рисунок 4). Анализ кривых показывает, что при всех скоростях воздуха скорость сушки в течение двух минут резко возрастает, достигая своего максимального значения. Затем наблюдается её снижение до минимума в конце сушки. Следовательно, при сушке ячменя практически отсутствует первый период сушки (период постоянной скорости сушки). В основном процесс протекает во втором периоде сушки.

Определены максимальные скорости сушки и построена графическая зависимость максимальной скорости сушки от скорости воздуха (рисунок 5). Из рисунка видно, что с увеличением скорости воздуха в 2,4 раза, максимальная скорость сушки увеличивается в 1,8 раза.

Проводя математический анализ данных (рисунок 5), выполненный средствами MS Excel, получена следующая зависимость для определения максимальной скорости сушки ячменя:

$$N_{\text{макс}} = (10,95\omega^2 + 2,75\omega + 4) \times 10^{-5}, \quad (6)$$

где $N_{\text{макс}}$ – максимальная скорость сушки, 1/с; ω – скорость воздуха, м/с. $R^2 = 1$.

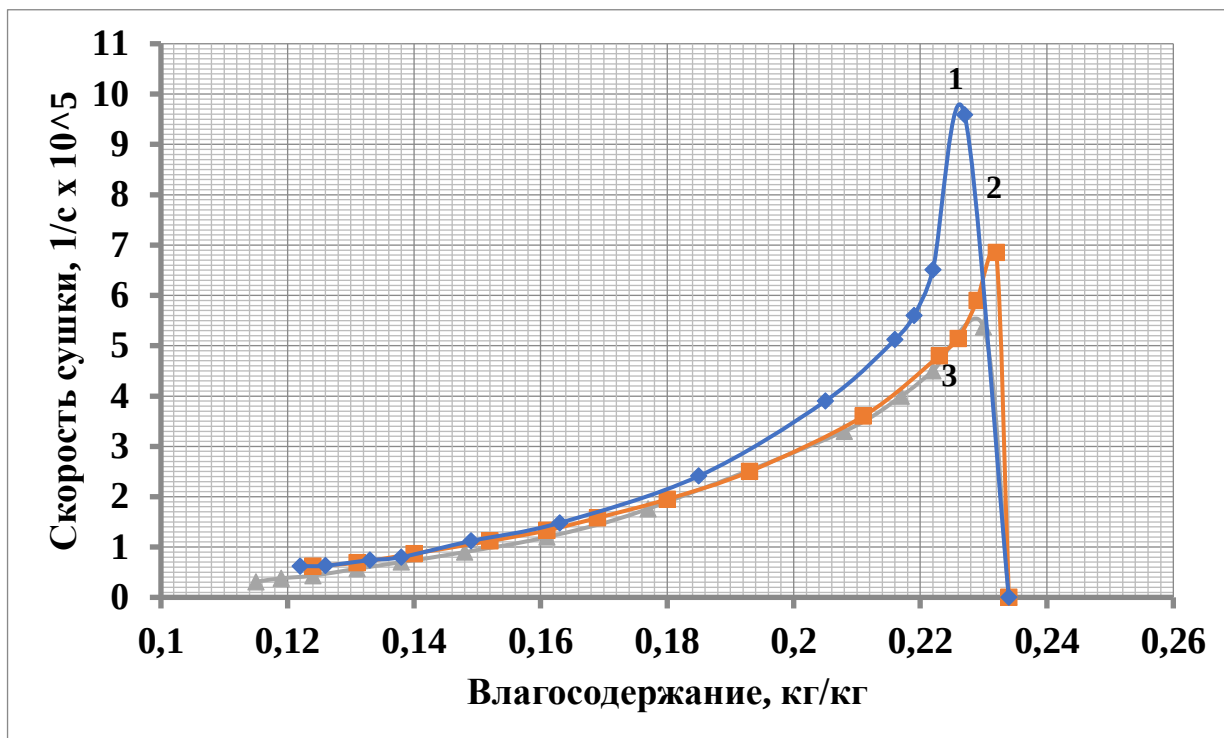


Рисунок 4. Зависимости скорости сушки ячменя для различных скоростей воздуха (кривые скорости сушки): 1 - 0,6 м/с; 2 - 0,4 м/с; 3 - 0,25 м/с.

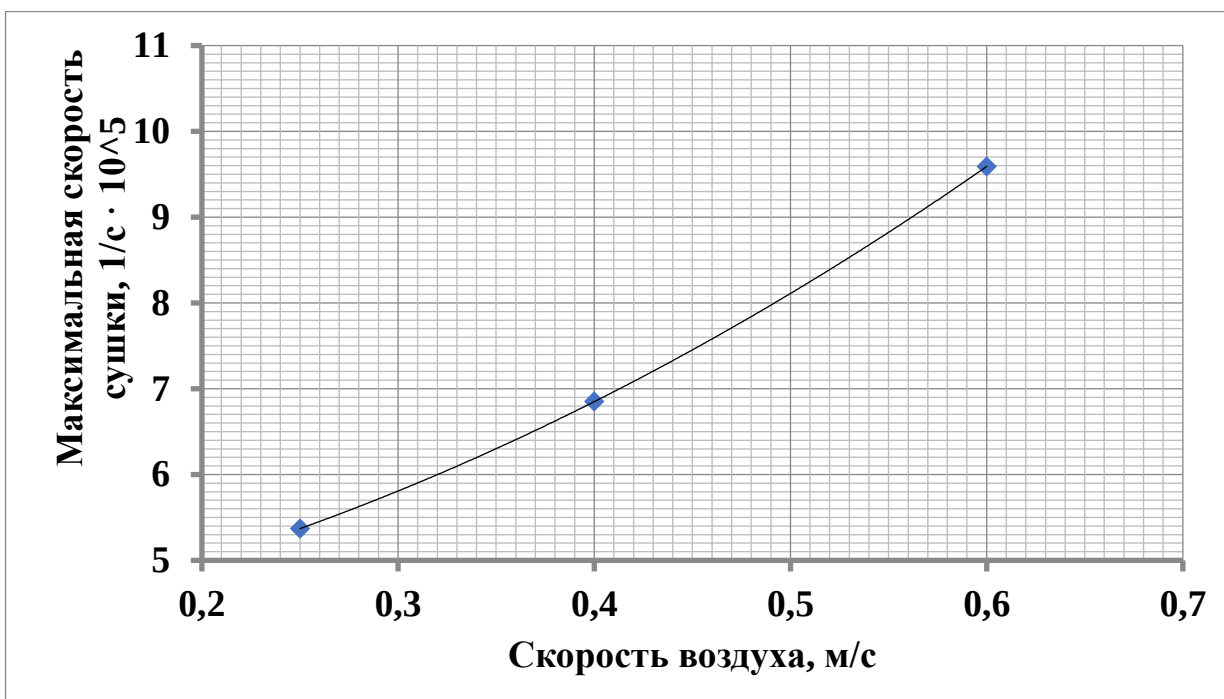


Рисунок 5. Зависимости максимальной скорости сушки ячменя от скорости воздуха.

Выводы

Скорость сушильного агента незначительно влияет на время сушки ячменя. Увеличение скорости сушильного агента в 2,4 раза позволяет сократить время сушки в 1,18 раз. При этом максимальная скорость сушки увеличивается в 1,8 раза. Полученные зависимости можно использовать при исследованиях и проектировании процессов сушки зерна ячменя.

Список литературы

1. Протасов, С.К. Конвективная сушка пуха рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник, - №1 - 2022 – С. 63 – 69.
2. Протасов, С.К. Влияние плотности пуха рогоза на кинетику сушки. / С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник, - №1 - 2023 – С. 63 – 69.
3. Протасов С.К. Сушка неподвижного слоя пшеницы весовым методом. / С.К. Протасов. А.А. Боровик, А.М. Брайкова. // Мичуринский агрономический вестник. №2, 2024. С. 14-19.
4. 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>.

Протасов Семен Корнеевич, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет

220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Калиновского, д. 58

Телефон рабочий +375172097989

E-mail: semenprotas@mail.ru

Боровик Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет

220028, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Великоморская, 10

Телефон +375172097989

E-mail: semenprotas@mail.ru

Брайкова Алла Мечиславовна, кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой физикохимии материалов и производственных технологий, Белорусский государственный экономический университет

220117, Республика Беларусь, г. Минск, пр. им. газеты «Звезда», д. 28

Телефон: +37517209-79-27

E-mail: semenprotas@mail.ru