

УДК 66. 047.75.4/5

## СУШКА НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ ПШЕНИЦЫ ВЕСОВЫМ МЕТОДОМ

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

*Белорусский государственный экономический университет*

Дана краткая характеристика весового метода для исследования кинетики сушки дисперсных материалов. Приведена схема установки для проведения сушки неподвижного слоя пшеницы весовым методом. Получены кривые сушки и кривые скорости сушки для зерен пшеницы при температурах воздуха 40 – 70 °С. Получены формулы для расчета времени сушки и максимальной скорости сушки в зависимости от температуры воздуха.

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

## *WEIGHT METHOD FOR STUDYING KINETICS OF DRYING DISPERSED MATERIALS*

**Protasov S.K., Borovik A.A., Braikova A.M.**

*Belarusian State University of Economics*

A brief description of the weight method for studying the kinetics of drying dispersed materials is given. The installation diagram for carrying out the drying studies by weight method is given. Drying curves and drying rate curves were obtained for wheat grains at different drying agent speeds and temperatures. Formulas are obtained for calculating drying time and maximum drying speed depending on temperature and speed of drying agent.

**Key words:** convective drying, wheat, drying time, equilibrium state, drying curves, drying speed curves.

---

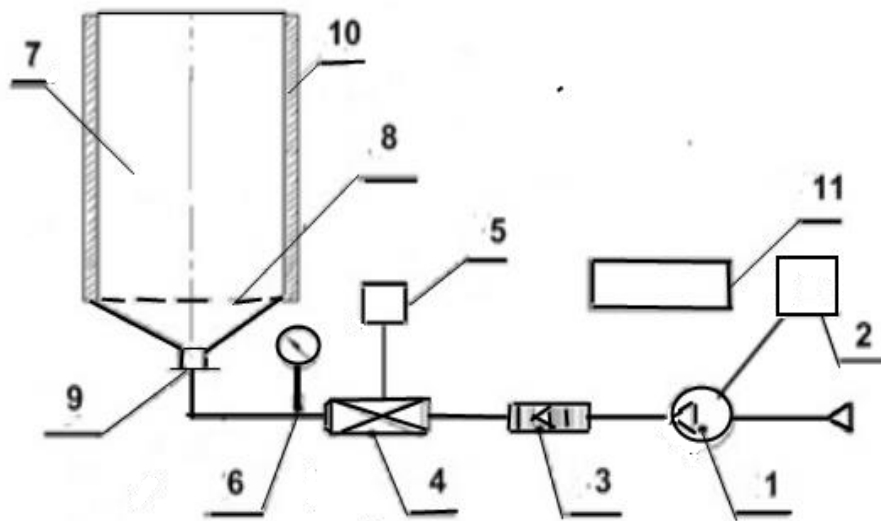
Исследования кинетики сушки дисперсных материалов предлагается проводить весовым методом. Метод разработан и опробован при исследовании сушки пуха рогоза [1-6]. Сущность метода заключается в том, что во время сушки сушилку вместе с влажным материалом периодически взвешивают. Для этого сушилка в нижней части имеет разъемное устройство, которое позволяет легко и быстро соединять её с трубопроводом, подводящим сушильный агент. В начале опыта сушилку взвешивают, помещают в неё влажный материал, и определяют суммарную массу. При выходе установки на рабочий режим, сушилку устанавливают в разъемное устройство, и фиксируют время начала опыта. Через некоторое время сушилку с материалом отсоединяют от трубопровода, взвешивают и быстро возвращают на место. Разность суммарной массы и массы сушилки даёт массу влажного материала в момент взвешивания. По массе влажного материала, и определённой предварительно массе сухой части исследуемого материала, определяют его влагосодержание. За счет многократного взвешивания получают зависимость влагосодержания материала от времени сушки (кинетическую кривую сушки).

### **Объекты и методы исследования**

Для исследования кинетики сушки дисперсных материалов весовым методом разработана лабораторная установка, которая представлена на рисунке 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 снизу в сушилку с влажным материалом 7, проходит через слой влажного материала, удаляет влагу из него, а затем выходит в атмосферу.



**Рисунок 1. Схема лабораторной установки. 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.**

Перед началом исследований определяют влагосодержание влажного дисперсного материала (начальное влагосодержание)  $U_n$ . Для этого из партии материала для исследований выбирают три навески небольшой массы (порядка 5 грамм) и определяют их начальные массы  $m_n$  с точностью до 0,01г. Навески помещают в сушильный шкаф, и сушат при температуре 100°. 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 материала  $m_{сyx}$ . Окончательную массу сухого материала принимают как среднее арифметическое трех навесок. Начальное влагосодержание влажного материала рассчитывают по формуле:

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

Последовательность проведения исследований. Включить воздуходувку 1 и с помощью автотрансформатора 2 установить необходимый расход воздуха по показаниям прибора 3. Включить электрический калорифер 4 и установить необходимую температуру воздуха с помощью автотрансформатора 5 и термометра 6. Определить массу сушилки  $M_{суш.}$  на весах 11 с точностью 0.01г. Заполнить сушилку влажным материалом с влагосодержанием  $U_n$ . Измерить высоту слоя материала и определить общую массу сушилки и материала  $M_{общ.}$  Начальная масса влажного материала для исследований:

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

Массу сухой части материала рассчитать по формуле:

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

При постоянном расходе и температуре воздуха, сушилку с влажным материалом установить в разъемное устройство 9 и зафиксировать время начала сушки. Через 3 минуты сушилку отсоединить от разъемного устройства, определить общую массу  $M_{общ.}$ , 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 материала в момент времени взвешивания рассчитать по формуле:

$$U_n = \frac{M_n - M_{сух}}{M_{сух}}, \quad (4)$$

где  $U_n$  – влагосодержание материала в  $n$ -й момент времени, кг/кг;  $M_n = M_{общ} - M_{суш.}$  – масса влажного материала в  $n$ -й момент времени, кг;  $M_{сух}$  – масса сухой части материала, кг.

Закончить исследования, когда влагосодержание материала достигнет равновесного значения, которое соответствует условиям дальнейшего хранения. При анализе кинетики сушки следует учитывать, что весовой метод позволяет определить среднее по объёму влагосодержание материала (среднее по высоте слоя). По зафиксированным данным времени взвешивания и, соответствующей ему массы материала, рассчитать влагосодержания материала. Построить графическую зависимость влагосодержания материала от времени сушки (кривую сушки). С помощью кривой сушки определить продолжительность (время) сушки материала 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 в сушилке с внутренним диаметром 0,076 м. В качестве дисперсного материала использовали зерна пшеницы сорта Батько. Сушку пшеницы проводили в неподвижном слое высотой 100 мм. В статье представлены результаты исследования влияния температуры сушильного агента, проходящего снизу вверх через слой пшеницы, на кинетику и время сушки. В качестве сушильного агента использовали нагретый воздух. Скорость воздуха, рассчитанная на полное сечение колонны, поддерживалась 0,7 м/с. Начальное влагосодержание пшеницы равнялось 0,217 кг/кг. Температуру воздуха на входе в сушилку изменяли от 40 до 70 °С.

На рис. 2 приведены кривые сушки, полученные в результате исследований. Из рис. 2 видно, что с увеличением температуры сушильного агента время сушки пшеницы существенно уменьшается. Например, при температуре 40 °С время сушки до конечного влагосодержания 0,12 кг/кг составляет 144 минуты, а при 70 °С – 30 минут.

Используя кривые сушки (рис.2), было определено время сушки пшеницы до влагосодержания 0,12 кг/кг для всех исследуемых температур. Построена графическая зависимость времени сушки от температуры (рис. 3). Анализ этой зависимости показывает, что температура сушильного агента существенно влияет на время сушки пшеницы. Увеличение температуры в 1,75 раза позволяет уменьшить время сушки 4,8 раза. Зависимость (рис.3) математически обработана, получена формула для расчета времени сушки пшеницы при различных температурах сушильного агента на входе в сушилку:

$$\tau = 0,14 t^2 - 19,14 t + 685,7, \quad (5)$$

где  $\tau$  - время сушки, мин;  $t$  - температура сушильного агента, °С. Коэффициент детерминации зависимости (5)  $R^2 = 0,9979$ .

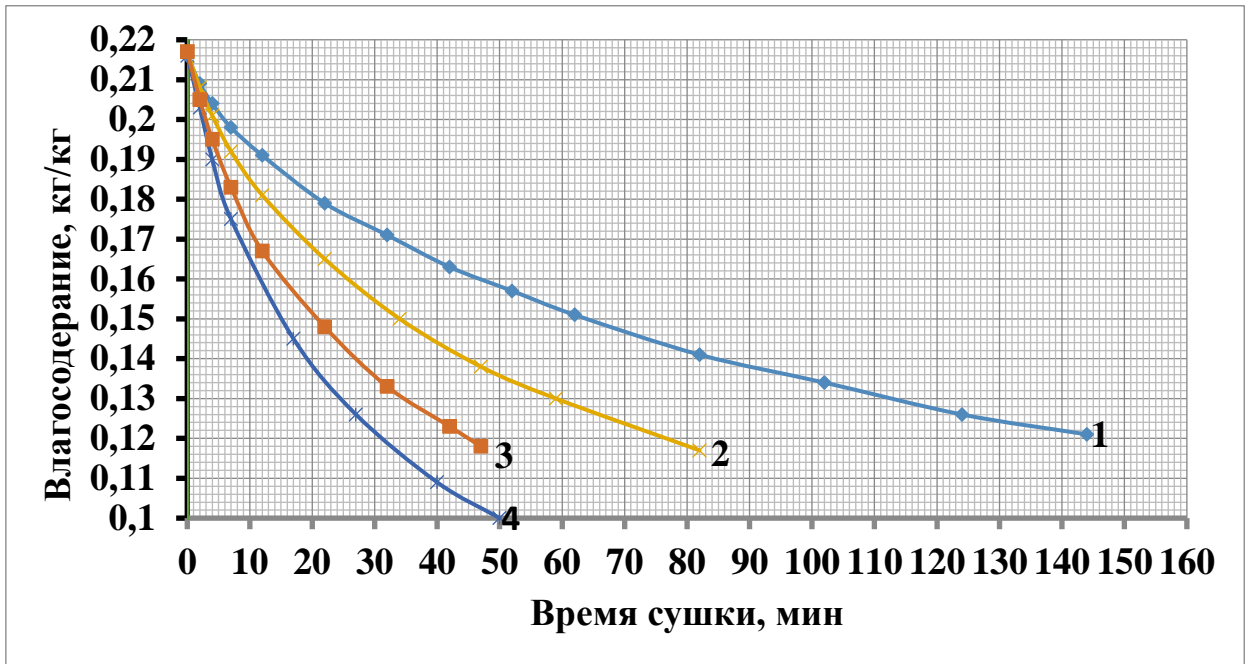


Рисунок 2. Зависимость влагосодержания пшеницы от времени сушки (кривые сушки) при различных температурах воздуха: 1 – 40; 2 – 50; 3 – 60; 4 – 70 °С.

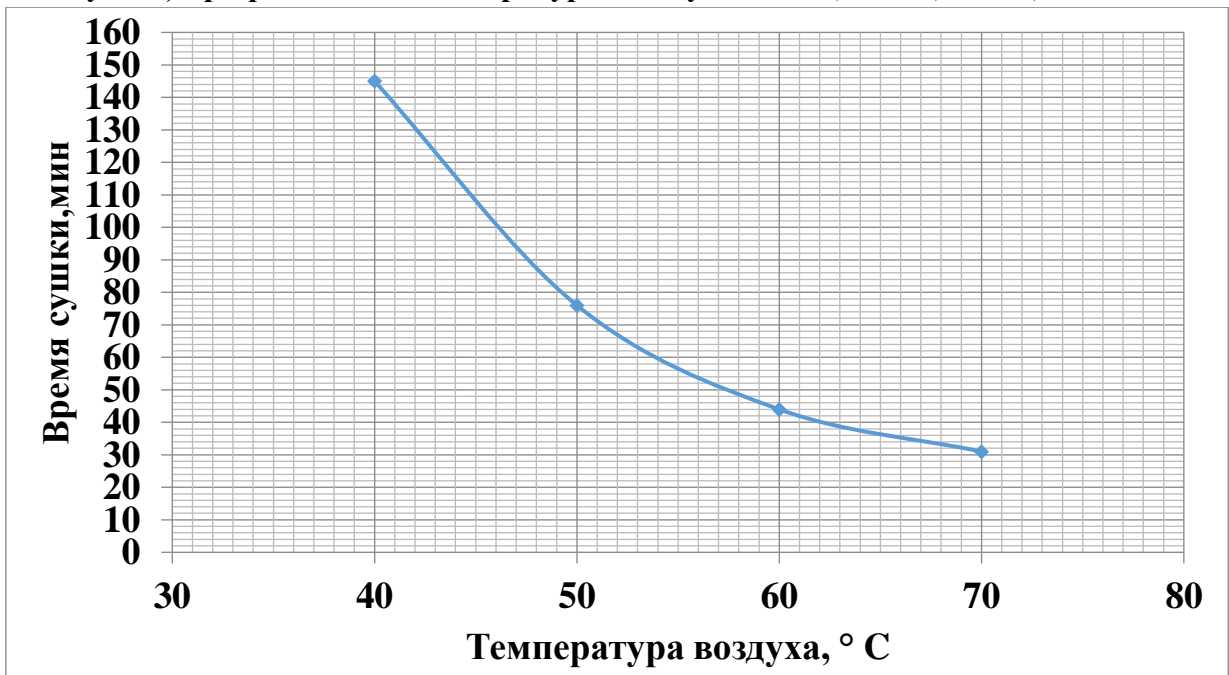


Рисунок 3. Зависимость времени сушки пшеницы от температуры воздуха.

С помощью графического интегрирования кривых сушки (рис.1) построены кривые скорости сушки при температурах воздуха от 40 до 70°C (рис.4). Анализ кривых показывает, что при всех температурах воздуха скорость сушки в течение 3-8 минут резко возрастает, достигая своего максимального значения.

Затем наблюдается её медленное снижение до минимума в конце сушки. Следовательно, при сушке пшеницы не наблюдается первый период сушки (период постоянной скорости сушки). В основном процесс протекает во втором периоде сушки.

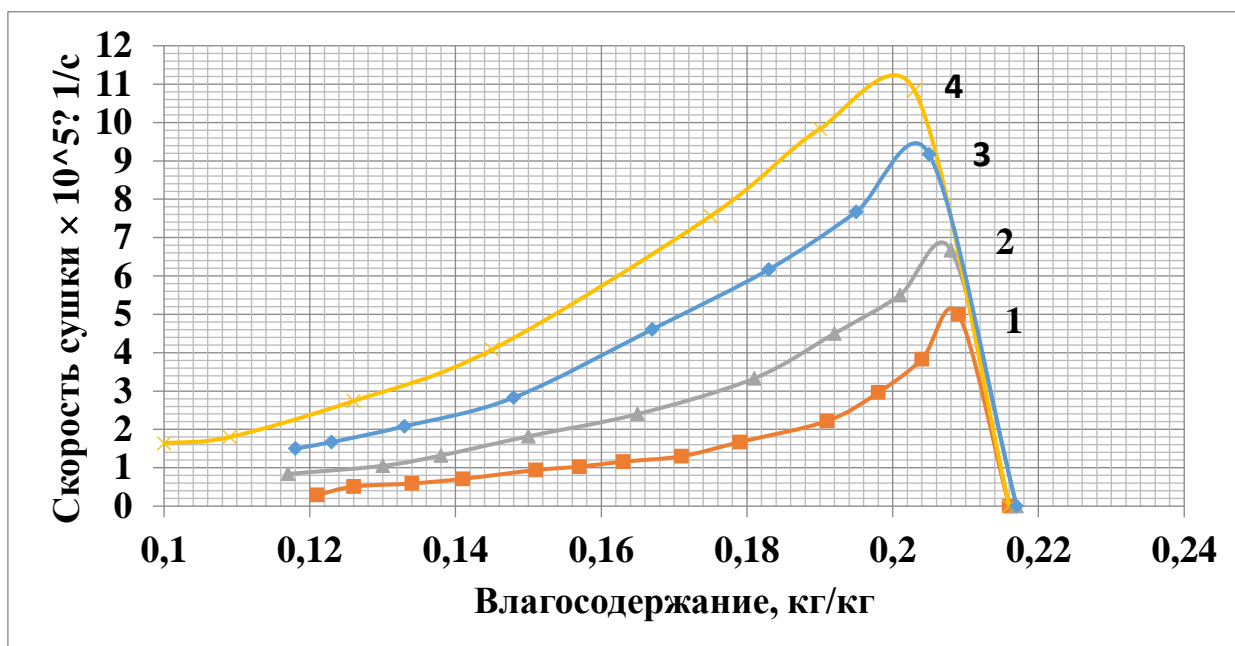


Рисунок 4. Зависимости скорости сушки пшеницы для различных температур воздуха (кривые скорости сушки): 1 – 40; 2 – 50; 3 – 60; 4 -70 °С.

Определены максимальные скорости сушки для исследуемых температур, построена графическая зависимость максимальной скорости сушки от температуры сушильного агента (рис.5). Из рисунка 5 видно, что с увеличением температуры в 1,75 раза, максимальная скорость сушки увеличивается в 2,2 раза.

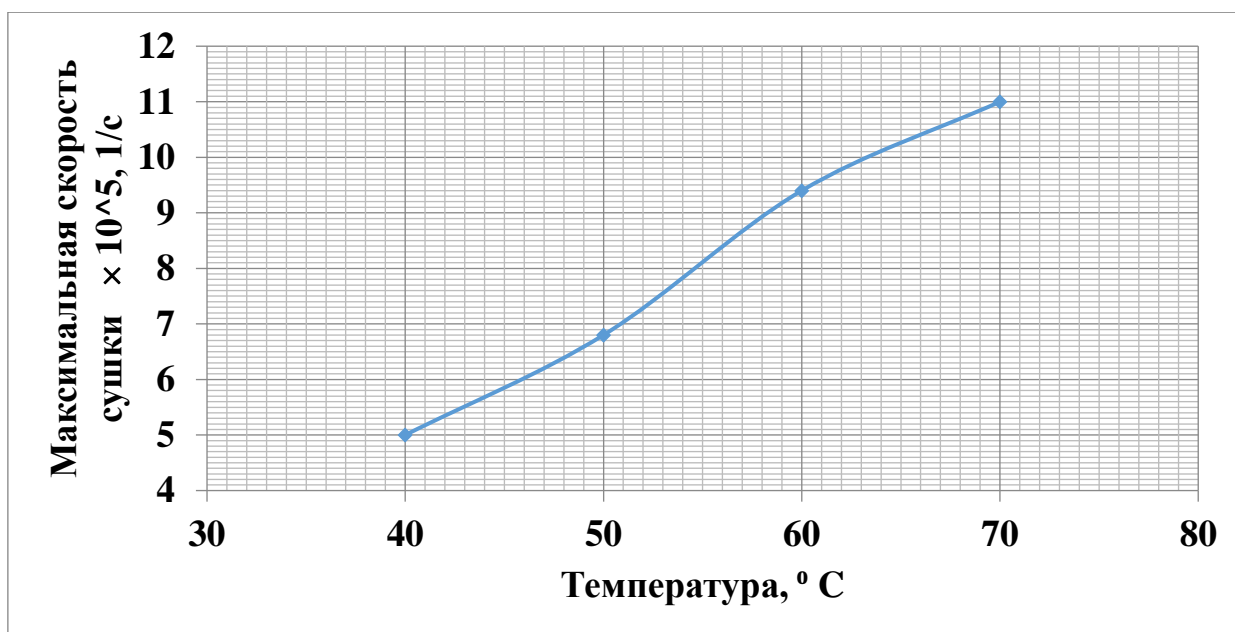


Рисунок 5. Зависимость максимальной скорости сушки от температуры сушильного агента.

По данным рисунка 5 получена расчётная зависимость:

$$N_{\text{макс}} = (0,206 t - 3,28) \times 10^{-5}, \quad (6)$$

где  $N_{\text{макс}}$  – максимальная скорость сушки, 1/с;  $t$  – температура сушильного агента, °С.

### Выводы

Температура сушильного агента существенно влияет на время сушки пшеницы. Увеличение температуры в 1,75 раза позволяет сократить время сушки в 4,8 раза, при этом максимальная скорость сушки увеличивается в 2,2 раза.

---

### Список литературы

1. Протасов С.К. Технология сушки природного высокоэффективного нефтесорбента на основе пуха початков рогоза. / Боровик А.А., Горовых О.Г., Альжанов Б.А. // Slovak international scientific journal. VOL.1. №52, 2021. С. 24-31.
  2. Протасов С.К. Исследование кинетики сушки пуха рогоза. / С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Горовых, А.М. Брайкова // Norwegian journal of development of the International Science. 2021. №70. С.36-41.
  3. Протасов, С.К. Кинетика сушки природного нефтесорбента – пуха рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Горовых, А.М. Брайкова // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. - Том 12, - №2 - 2022 – С. 46 -54
  4. Протасов, С.К. Конвективная сушка пуха рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник, - №1 - 2022 – С. 63 – 69.
  5. 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.
  6. Протасов С.К., Боровик А.А., Брайкова А.М. Расчет времени сушки пуха рогоза в конвективной сушилке. Мичуринский агрономический вестник. №2, 2023. С. 65-74.
- 

**Протасов Семен Корнеевич**, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет  
220086, г. Минск, ул. Калиновского, д. 58, кв. 32  
Телефон: +375172097989  
E-mail: semenprotas@mail.ru

**Боровик Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет  
220028, г. Минск, ул. Великоморская, 10, кв. 6  
Телефон: +375172097989  
E-mail: semenprotas@mail.ru

**Брайкова Алла Мечиславовна**, кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой физико-химии материалов и производственных технологий, Белорусский государственный экономический университет.  
220117, г. Минск, пр. им. газеты «Звезда», д. 28, к. 1, кв. 151  
Телефон: +37517209-79-27  
E-mail: semenprotas@mail.ru