

УДК 66. 047.75.4/5

ПОСЛОЙНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ ЗЕРНА В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ

Протасов С.К., Боровик А.А., Брайкова А.М.
Белорусский государственный экономический университет

Дана характеристика весового метода для исследования кинетики сушки зернистых материалов. Приведена схема установки для проведения послойной сушки неподвижного слоя зерна пшеницы весовым методом. Представлены кинетические кривые сушки для трёх неподвижных слоёв пшеницы при температуре сушильного агента 40°C. Приведены зависимости влагосодержания и времени сушки пшеницы от высоты слоя.

Ключевые слова: конвективная, послойная, сушка, весовой метод, пшеница, кинетические кривые.

LAYER-BY-LAYER STUDY OF GRAIN DRYING KINETICS IN A FIXED LAYER

Protasov S.K., Borovik A.A., Braikova A.M.
Belarusian State University of Economics

The characteristics of the weight method for the study of the kinetics of drying granular materials are given. Installation for layer-by-layer drying of fixed wheat grain layer by weight method is presented. Kinetic drying curves are presented for three fixed layers of wheat at a drying agent temperature of 40 ° C. Dependence of moisture content and drying time of wheat on layer height is given.

Key words: convective, layer-by-layer, drying, weight method, wheat, kinetic curves.

Конвективная сушка зерна в неподвижном слое характерна тем, что сушильный агент снизу проходит через слой вверх. Весь слой зернистого материала можно представить условно как множество относительно тонких горизонтальных подслоев, расположенных без разрывов один над другим. Сушильный агент в начале процесса сушки входит в нижний подслой и взаимодействует с ним. Подслой нагревается, из него испаряется влага, и его влагосодержание уменьшается. Воздух, вследствие приходящей из материала влаги, увлажняется. Поскольку воздух отдаёт часть своей теплоты на испарение влаги, то его температура при сушке 1-го подслоя будет уменьшаться. На выходе из 1-го подслоя и на входе во 2-ой влагосодержание сушильного агента будет выше, а температура ниже по сравнению с входом в 1-ый подслой. Следовательно, движущая сила и скорость сушки 2-го подслоя будет ниже, чем в 1-ом подслое [1,2]. Аналогичные рассуждения справедливы для вышележащих подслоев. В результате, нижний подслой окажется наиболее высушенным и нагретым, верхний – наиболее влажным и холодным. Подслои, находящиеся между нижним подслоем и верхним, будут иметь промежуточные значения. Причем влагосодержания этих подслоев будет увеличиваться вверх по движению теплоносителя, а температура - снижаться.

Исходя из вышесказанного, следует, что по высоте слоя зерна наблюдается распределение влагосодержания и температур.

Важно и то, что сушильный агент на выходе из слоя зерна может достичь полного насыщения влагой, а его температура – начальной температуре зерна. Для конкретных начальных условий сушки (температуры, относительной влажности, скорости движения теплоносителя, а также начальном влагосодержании и температуры зерна) существует предельная высота слоя зерна, когда сушка заканчивается.

Объекты и методы исследования

Исследования конвективной сушки зерна в неподвижном слое изучали с помощью весового метода [3-9]. Сущность метода заключается в том, что сушилку с зерном в процессе сушки периодически отсоединяют от работающей установки, и взвешивают. Для этого сушилка в нижней части имеет разъёмное устройство, которое позволяет легко и быстро соединять её с трубопроводом, подводящим сушильный агент. В начале опыта определяют массу сушилки, затем помещают в неё влажное зерно, и определяют суммарную массу. При выходе установки на рабочий режим, сушилку с влажным зерном устанавливают в разъёмное устройство, и фиксируют время начала опыта. Через определённое время сушилку с зерном отсоединяют от трубопровода, взвешивают, и быстро возвращают на место. По разности суммарной массы и массы сушилки определяют массу влажного зерна в момент взвешивания. Масса влажного зерна и масса его сухой части, которую определяют в начале опыта, позволяет определить влагосодержание зерна. За счет многократного взвешивания получают зависимость влагосодержания зерна от времени сушки (кинетическую кривую сушки). Весовой метод позволяет определить влагосодержания в средней части объёма зерна, то есть на $\frac{1}{2}$ высоты слоя. Поскольку влагосодержание неподвижного слоя зерна с нижним подводом сушильного агента изменяется по высоте, то для определения зависимости влагосодержания от высоты слоя лабораторная установка была усовершенствована. Схема усовершенствованной установки показана на рисунке 1. В корпусе неподвижной сушилки 12 установлены одна на другой выдвижные сушильные камеры 7. Камеры выполнены из цилиндра небольшой высоты с днищем из сетки 8. Влажное зерно расположено на всю высоту камер. Диаметр камер несколько меньше диаметра сушилки 12, что позволяет их свободно извлекать из неё. Это даёт возможность периодически взвешивать камеры и определять влагосодержание зерна в них во время взвешивания. Небольшая высота камер обеспечивает более точно определить распределения влагосодержания зерна по высоте слоя.

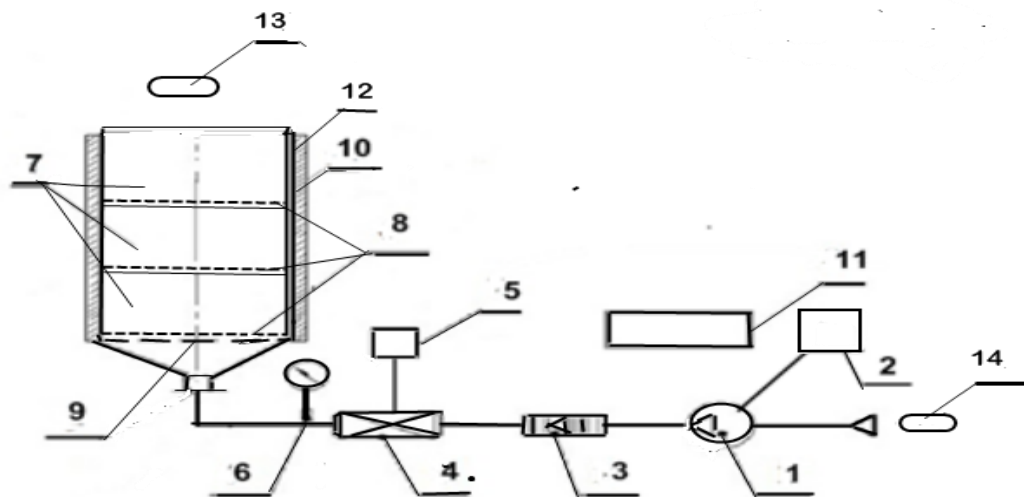


Рисунок 1. Схема лабораторной установки. 1- воздушодувка; 2 – автотрансформатор; 3 – ротаметр; 4 – калорифер; 5 – автотрансформатор; 6 – термометр; 7 – выдвижные сушильные камеры; 8 – сетчатые днища камер; 9 – опорная решётка сушилки; 10 – теплоизоляция; 11 – весы; 12 - корпус сушилки; 13, 14 – термогигрометры.

Принцип работы установки. Атмосферный воздух (сушильный агент) воздуходувкой 1 подаётся в электрический калорифер 4. Расход воздуха регулируется автотрансформатором 2, и измеряется ротаметром 3. В калорифере воздух нагревается до необходимой температуры, которая контролируется термометром 6, и регулируется с помощью лабораторного автотрансформатора 5. Нагретый воздух поступает в сушилку 12, с расположенными в ней сушильными камерами 7. Пройдя в камерах через слой влажного зерна, воздух насыщается влагой и выходит в атмосферу. С помощью термогигрометров 13 и 14 определяется температура и относительная влажность поступающего и уходящего из установки воздуха.

В начале эксперимента 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 0,01г. Навески сушат в сушильном шкафу при температуре 100°C. 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 материала. Окончательную массу сухого материала $m_{сух}$ принимают как среднее арифметическое трех навесок. Начальное влагосодержание влажного зерна рассчитывают по формуле:

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

Последовательность проведения исследований. Включают воздуходувку 1, и с помощью автотрансформатора 2 устанавливают необходимый расход воздуха по показаниям ротаметра 3. Включают электрический калорифер 4, и устанавливают необходимую температуру воздуха на входе в сушилку с помощью автотрансформатора 5 и термометра 6. Определяют массу нижней, средней и верхней сушильной камеры без зерна $M_{суш.}$ на весах 11 с точностью 0.01г. Заполняют сушильные камеры на всю высоту влажным зерном с влагосодержанием U_n . Определяют общую массу каждой сушильной камеры с зерном $M_{общ.}$ Начальная масса влажного зерна для исследований в каждой сушильной камере:

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

Масса сухой части зерна в каждой сушильной камере:

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

Устанавливают по порядку сушильные камеры с влажным зерном в сушилку 12, и фиксируют время начала сушки. Через 2 минуты сушильные камеры по очереди вынимают из сушилки, определяют общую массу $M_{n. общ.}$ каждой, и быстро устанавливают на прежнее рабочее место. Последующие два взвешивания производят через 5 минут. Остальные временные интервалы между измерениями массы сушильных камер можно увеличивать, в зависимости от начальных условий сушки. Влагосодержание зерна в каждой сушильной камере в момент взвешивания рассчитывают по формуле:

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

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

Заканчивают опыт, когда влагосодержание зерна в верхней сушильной камере достигнет равновесного значения – 0,12 кг/кг, которое соответствует условиям длительного хранения зерна пшеницы [10]. По опытным данным строят графическую зависимость влагосодержания зерна от времени сушки (кривую сушки) для каждой сушильной камеры.

С помощью кривых сушки определяют продолжительность (время) сушки зерна до равновесного состояния в каждой сушильной камере. Графическим интегрированием кривых сушки получают изменение скорости сушки в зависимости от влагосодержания материала (кривые скорости сушки).

Результаты и их обсуждение

Исследования проводили в трёх выдвижных сушильных камерах с наружным диаметром 0,074 м и внутренним диаметром 0,073 м. Высота камер равнялась 0,028 м. Внутренний диаметр корпуса сушилки 0,076 м. Исследовали пшеницу сорта «Батько». Температура воздуха, поступающего в сушилку, поддерживалась 40°C, а его скорость в сушильных камерах – 0,42 м/с. Температура атмосферного воздуха 20°C, а относительная влажность – 40%. Начальное влагосодержание пшеницы задавали 0,22 кг/кг. Эта величина соответствует усреднённому значению верхней границы влагосодержания при сборе урожая пшеницы на территории РБ [11].

Для создания влагосодержания 0,22 кг/кг высушенное зерно замачивали. С этой целью в зерновую массу добавляли воду, массу которой рассчитывали по формуле:

$$M_{\text{вод. д.}} = (U_{\text{к}} - U_{\text{н}}) M_{\text{з}} / (1 + U_{\text{н}}), \quad (5)$$

где $M_{\text{вод. д.}}$ – масса воды добавленной, г; $U_{\text{н}}$ – влагосодержание зерна, которое берётся для замачивания, кг/кг; $U_{\text{к}}$ – влагосодержание зерна, которое требуется получить, кг/кг; $M_{\text{з}}$ – масса зерна, взятого для замачивания, г. После замачивания, зерновую массу помещали в герметичную емкость, и для равномерного распределения влаги, периодически перемешивали. Замачивание проводили в течение шести суток, чтобы обеспечить проникновение влаги к ядру зёрен.

Кривые сушки для трёх сушильных камер представлены на рис.2.

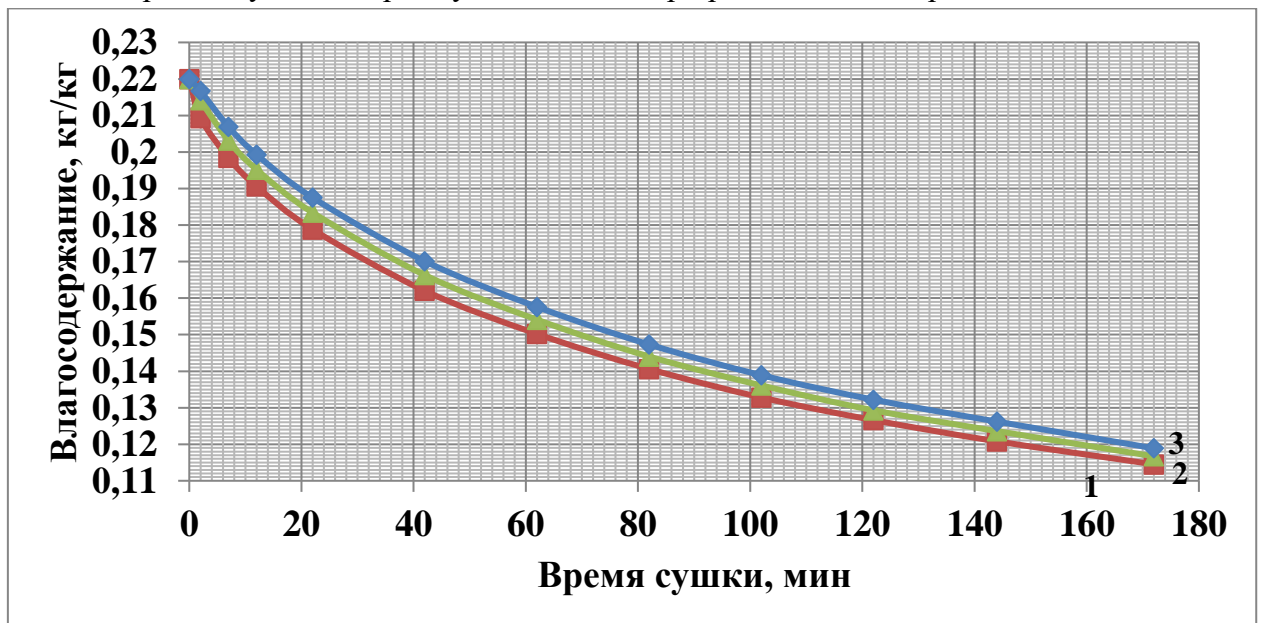


Рисунок 2. Кривые сушки пшеницы в трёх камерах:
1 – нижняя камера; 2 – средняя; 3 – верхняя.

Из рисунка 2 следует, что через 146 мин зерно в нижней камере высушивается до влагосодержания 0,12 кг/кг. В это же время слой зерна в средней камере высушивается до влагосодержания 0,123 кг/кг, а в верхней камере – до 0,1255 кг/кг. Весовой метод определяет влагосодержание зерна на половине высоты слоя.

Высота сушильных камер равна 28 мм. Тогда для нижней камеры влагосодержания 0,12 кг/кг установлено на высоте 14 мм.

Влагосодержания 0,123 кг/кг устанавливается на высоте 42 мм для средней камеры. Влагосодержания 0,1255 кг/кг устанавливается на высоте 70 мм для верхней камеры. На основании этих данных построена зависимость влагосодержания от высоты слоя зерна, то есть распределение влагосодержания зерна пшеницы по высоте слоя (рис.3).

Данные зависимости влагосодержания от высоты слоя математически обработаны. Получена формула распределения влагосодержания по высоте слоя:

$$U = 0,0001h + 0,1187, \quad (6)$$

где U – влагосодержание зерна, кг/кг; h – высота слоя зерна, мм. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9976$.

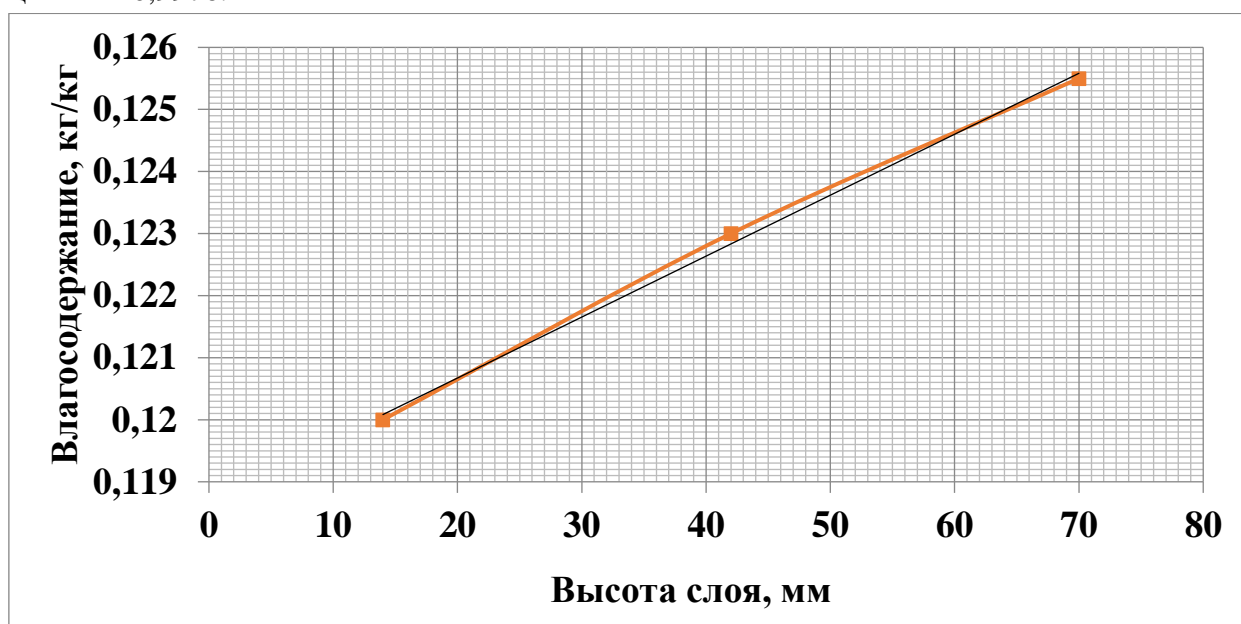


Рисунок 3. Распределение влагосодержания зерна пшеницы по высоте слоя.

Расчёты по формуле 6 показывает, что влагосодержание зерна на входе воздуха в нижнюю сушильную камеру равно 0,1187 кг/кг, а на выходе из верхней сушильной камеры, при высоте зоны сушки 84 мм, равно 0,1271 кг/кг.

С помощью кривых сушки (рис. 2) определено время сушки зерна пшеницы до равновесного влагосодержания 0,12 кг/кг для нижнего, среднего и верхнего слоя и построена зависимость времени сушки от высоты слоя (рис. 4). Получена формула для расчёта времени сушки зерна пшеницы в зависимости от высоты слоя зерна:

$$\tau = 0,375 h + 141,25, \quad (7)$$

где τ – время сушки, мин; h – высота слоя зерна, мм. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9932$.

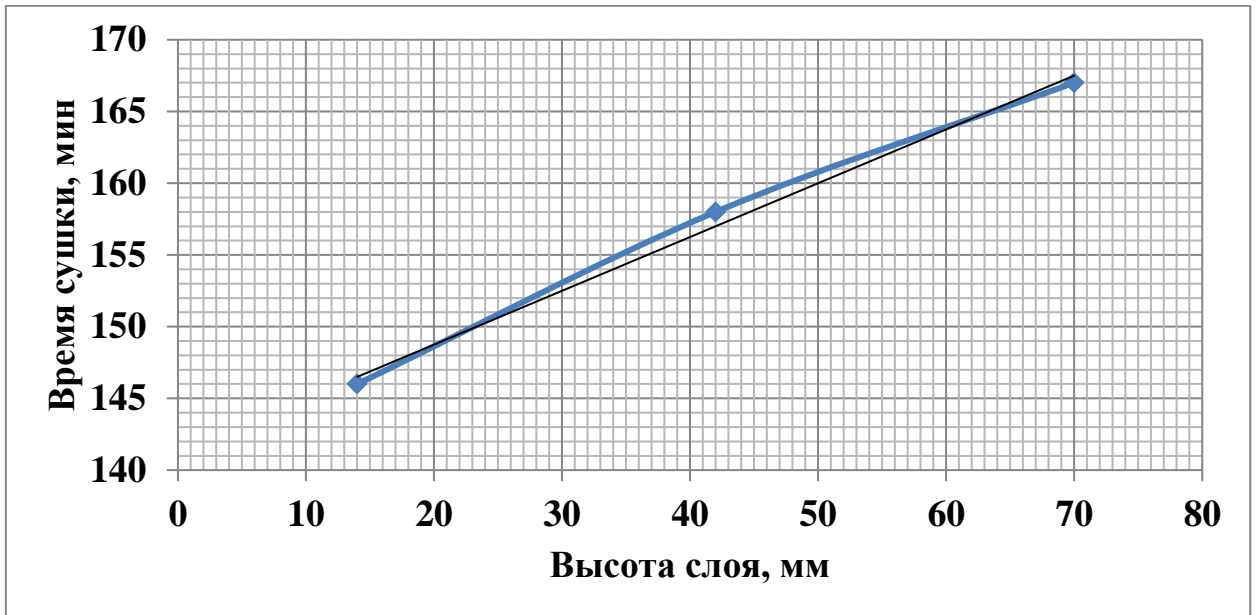


Рисунок 4. Зависимость времени сушки зерна пшеницы от высоты слоя.

Графическим интегрированием кривых сушки (рис.2) построены кривые скорости сушки для трёх сушильных камер (рис.5). На основании рисунков 2 и 5 установлено, что в течение 2 минут в нижней камере, через 3 минуты в средней и через 4 минуты в верхней камере скорость сушки достигает своего максимума. Затем наблюдается резкое снижение скоростей, а через 30 минут скорости сушки практически выравниваются во всех камерах. Согласно теории [1,2], весь процесс протекает во втором периоде, то есть при падающей скорости сушки. Более интенсивно сушка зерна идёт в нижней сушильной камере (нижнем подслое). Максимальная скорость сушки в нижней камере 1.61 раза больше чем в средней камере. Соответственно, в 2.39 раза больше чем в верхней камере.

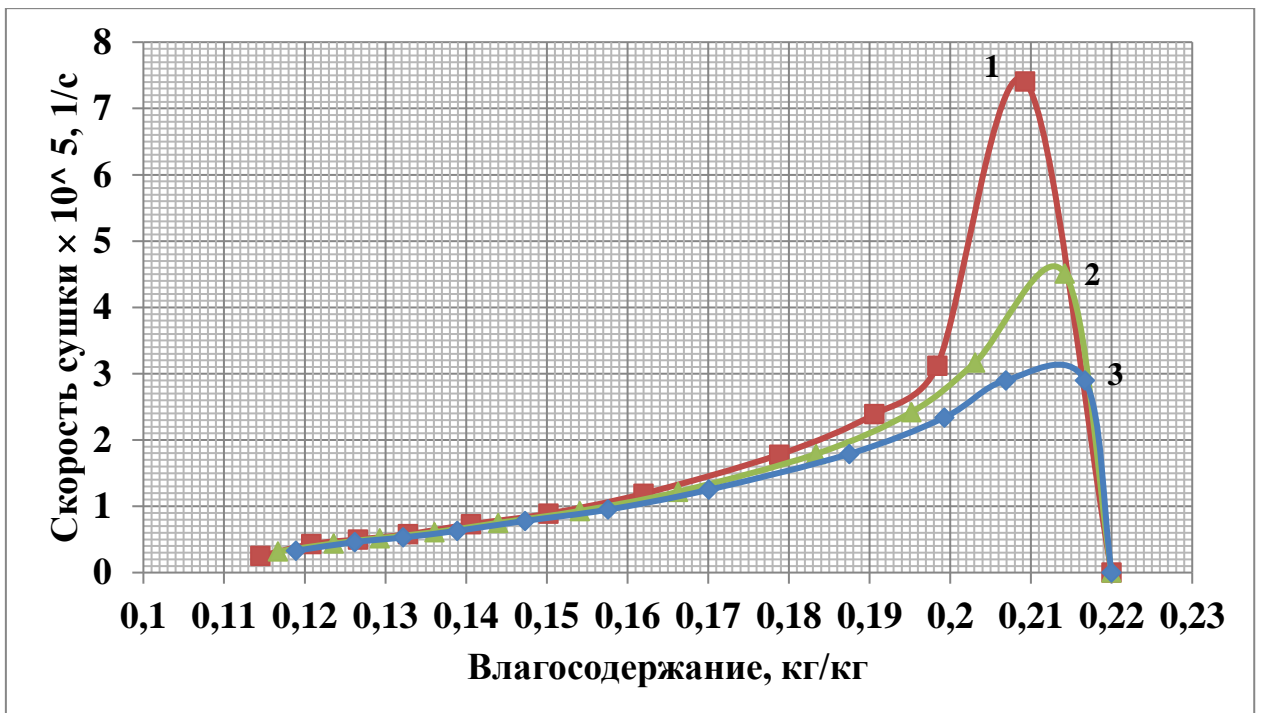


Рисунок 5. Кривые скорости сушки пшеницы в камерах сушки: 1 – нижняя; 2 – средняя; 3 – верхняя камеры.

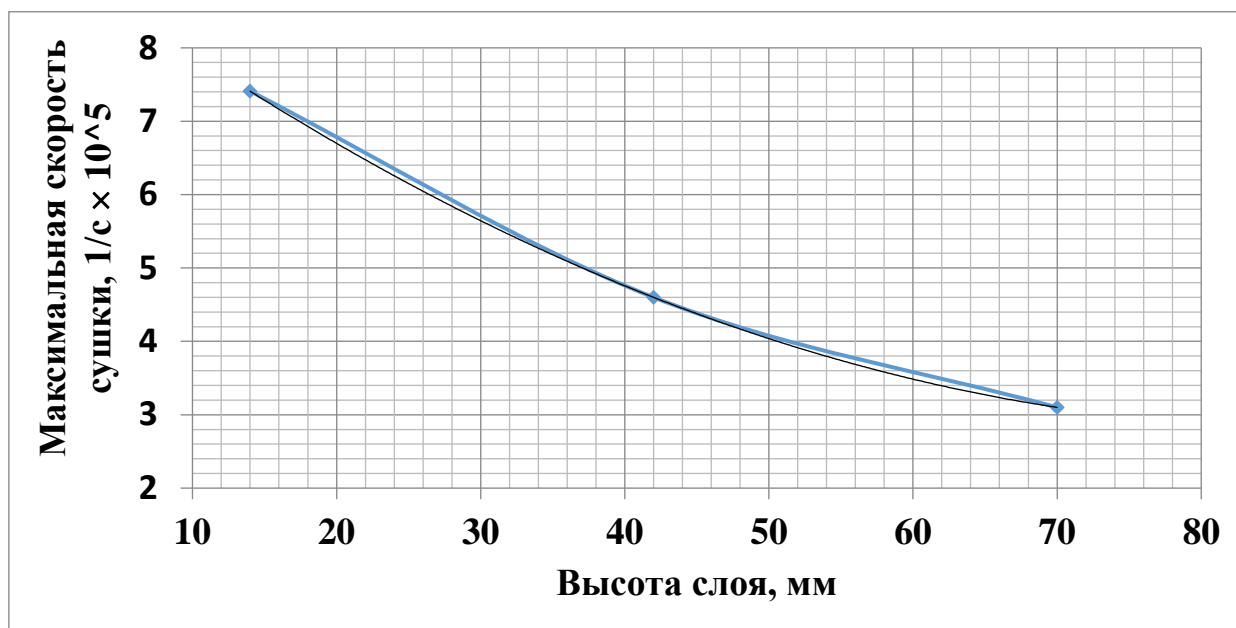


Рисунок 6. Зависимость максимальной скорости сушки от высоты слоя зерна.

Построена зависимость максимальной скорости от высоты слоя зерна (рис.6). Данные математически обработаны. Получена зависимость для расчёта максимальной скорости сушки:

$$N_{max} = (0,0008h^2 - 0,1471h + 0,3) \times 10^{-5}, \quad (8)$$

где N_{max} – максимальная скорость сушки, $1/с$; h – высота слоя зерна, мм. Коэффициент детерминации $R^2 = 1$.

Выводы

1. Распределение влагосодержания зерна пшеницы представляет собой прямолинейную зависимость с тангенсом угла наклона = 0.0001.
2. Время сушки неподвижного слоя зерна пшеницы зависит от высоты слоя по прямолинейной зависимости с тангенсом угла наклона 0.375.
3. Максимальная скорость сушки в нижней камере 1.61 раза больше чем в средней камере. Соответственно, в 2.39 раза больше чем в верхней камере.

Список литературы

1. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Войтов И.В. Процессы и аппараты химической технологии. Массообменные процессы. Сборник примеров и задач. / И.В. Войтов И.В., А.А. Боровик, А.И. Вилькоцкий, С.К. Протасов // Минск: БГТУ, 2017. 509 с. (гриф МО).
3. Протасов С.К. Технология сушки природного высокоэффективного нефтесорбента на основе пуха початков рогоза. / С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Горových, Б.А. Альжанов // Slovak international scientific journal. VOL.1. №52, 2021. С. 24-31.
4. Протасов С.К. Исследование кинетики сушки пуха рогоза. / С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Горových, А.М. Брайкова // Norwegian journal of development of the International Science. 2021. №70. С.36-41.
5. Протасов, С.К. Кинетика сушки природного нефтесорбента – пуха рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, О.Г. Горových, А.М. Брайкова // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. - Том 12, - №2 - 2022 – С. 46 -54
6. Протасов, С.К. Конвективная сушка пуха рогоза / С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник, - №1 - 2022 – С. 63 – 69.

7. 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.
8. Протасов С.К. Расчет времени сушки пуха рогоза в конвективной сушилке. / С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник. №2, 2023. С. 65-74.
9. Протасов С.К. Естественная сушка пуха рогоза. // С.К. Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 527-530.
10. Разворотнев А.С. Режимы хранения и вентилирования зерна пшеницы в металлических силосах большой вместимости. / А.С. Разворотнев, Ю.Д. Гавриченко, И.А. Кечкин // Хлебопродукты. - № 11, - 2017 – С. 57 – 59.
11. Зерносушилки: методические указания к лабораторной работе / А.К. Дубовский, Я.У. Яроцкий, А. Н. Чайчиц. // – Горки: БГСХА, 2016. – 28 с.

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