

УДК 66. 047.75.4/5

СУШКА ЗЕРНА В ВЕРТИКАЛЬНОМ НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ

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

Белорусский государственный экономический университет

Получены кривые сушки и кривые скорости сушки при конвективной сушке пшеницы в трёх неподвижных слоях пшеницы, расположенных друг над другом. Определена высота зоны сушки и время сушки слоя такой высоты. Получены зависимости времени сушки, максимальной скорости сушки и влагосодержания от высоты слоя пшеницы. Проведен анализ полученных зависимостей и предложен способ непрерывной сушки неподвижного слоя, обеспечивающий постоянство влагосодержания зерна на выходе из сушилки.

Ключевые слова: способ сушки, конвективная сушка, весовой метод, пшеница, кинетические кривые, время сушки, скорость сушки.

DRYING GRAIN IN A VERTICAL FIXED-BED LAYER

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

Belarusian State University of Economics

Drying curves and drying rate curves were obtained for convective drying of wheat in three fixed wheat layers located one above the other. The drying zone height and drying time for a layer of this height were determined. The dependences of drying time, maximum drying rate, and moisture content on the wheat layer height were obtained. An analysis of the obtained dependences was performed, and a method for continuous drying of a fixed bed was proposed, ensuring a constant moisture content of grain at the dryer outlet.

Key words: drying method, convective drying, gravimetric method, wheat, kinetic curves, drying time, drying rate.

Исследованиям конвективной сушки зерна в плотном неподвижном слое посвящено большое количество работ. В этих работах рассматривается кинетика сушки неподвижного слоя зерна в сушилках напольного типа. Однако в них не решены вопросы неравномерности сушки по высоте слоя зерна.

Исследования некоторых авторов показали, что в процессе конвективной сушки камерной зерносушилки напольного типа в неподвижном слое можно выделить зону, где сушка происходит наиболее интенсивно [7,9]. Её называют зоной сушки, поскольку сушка зерна осуществляется по всей толщине слоя. Для определения размеров зоны сушки зерна Н.М. Савич предложил следующие понятия. Высота зоны сушки – это расстояние между верхней и нижней её границами. Верхняя граница зоны сушки – это слой зерна с влагосодержанием близким к начальному (то есть процесс сушки в этом слое не начался). Нижняя граница зоны сушки – это слой зерна с влагосодержанием близким к равновесному (процесс сушки в этом слое уже завершен) [9]. Для исследований конвективной сушки зерна в плотном неподвижном слое в ряде работ используют моделирование [12-15]. Итоги моделирования показывают, что сушка зерна по высоте слоя проходит неравномерно.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований стало зерно пшеницы марки Батько. Начальное влагосодержание зерна 0,22 кг/кг. Температура сушки 60°C. Скорость воздуха в сушильных камерах 0,42 м/с. Температура атмосферного воздуха 20 °С, относительная влажность 40%. Исследование кинетики сушки проводились весовым методом. Сущность метода заключается в том, что сушилку с зерном периодически отсоединяют от работающей установки, и взвешивают [10, 11]. Весовой метод позволяет определить влагосодержания в средней части объёма зерна, то есть на $\frac{1}{2}$ высоты слоя. Для послойного исследования разработана лабораторная установка [11], схема которой показана на рисунке 1.

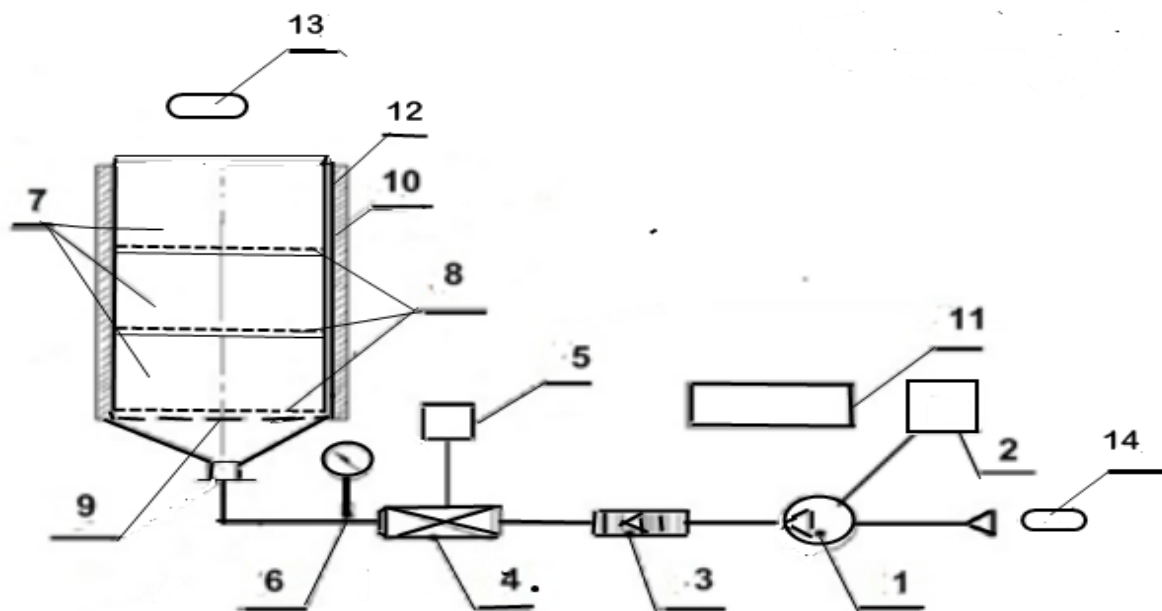


Рисунок 1. Схема лабораторной установки: 1 - воздушодувка; 2 – автотрансформатор; 3 – ротаметр; 4 – калорифер; 5 – автотрансформатор; 6 – термометр; 7 – выдвижные сушильные камеры; 8 – сетчатые днища камер; 9 – опорная решётка сушилки; 10 – теплоизоляция; 11 – весы; 12 - сушилка; 13, 14 – термогигрометры.

Принцип работы установки, подготовка зерна для исследований и последовательность проведения исследований подробно описаны в работе [11].

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 приведены кинетические кривые сушки трёх сушильных камер, высота каждой камеры 28 мм. Из рисунка видно, что характер изменения кривых сушки для каждой камеры одинаков, то есть по всей толщине слоя сушка зерна пшеницы идёт равномерно.

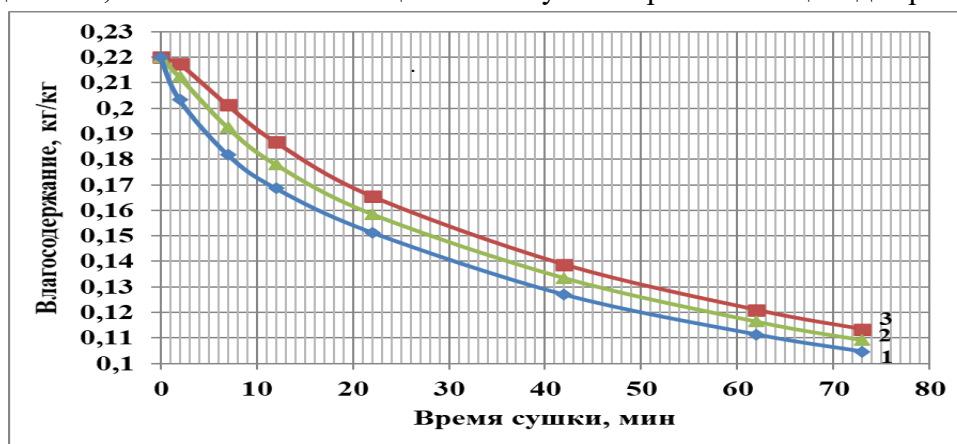


Рисунок 2. Кривые сушки пшеницы для сушильных камер:
1– нижняя; 2– средняя; 3– верхняя

С помощью кривых сушки (рисунок 2) определено время сушки пшеницы в каждом слое до конечного влагосодержания 0,12 кг/кг. Поскольку влагосодержание определено весовым методом, то в любой точке графической зависимости значение влагосодержания соответствуют среднему значению объёма камеры. Для нижней камеры высота слоя зерна равна 14 мм, для средней – 42 мм и для верхней – 70 мм. По полученным данным построена графическая зависимость времени сушки от половины высоты слоя зерна в каждой сушильной камере, которая представлена на рисунке 3. Можно видеть, с увеличением высоты слоя зерна время сушки увеличивается по прямолинейной зависимости.

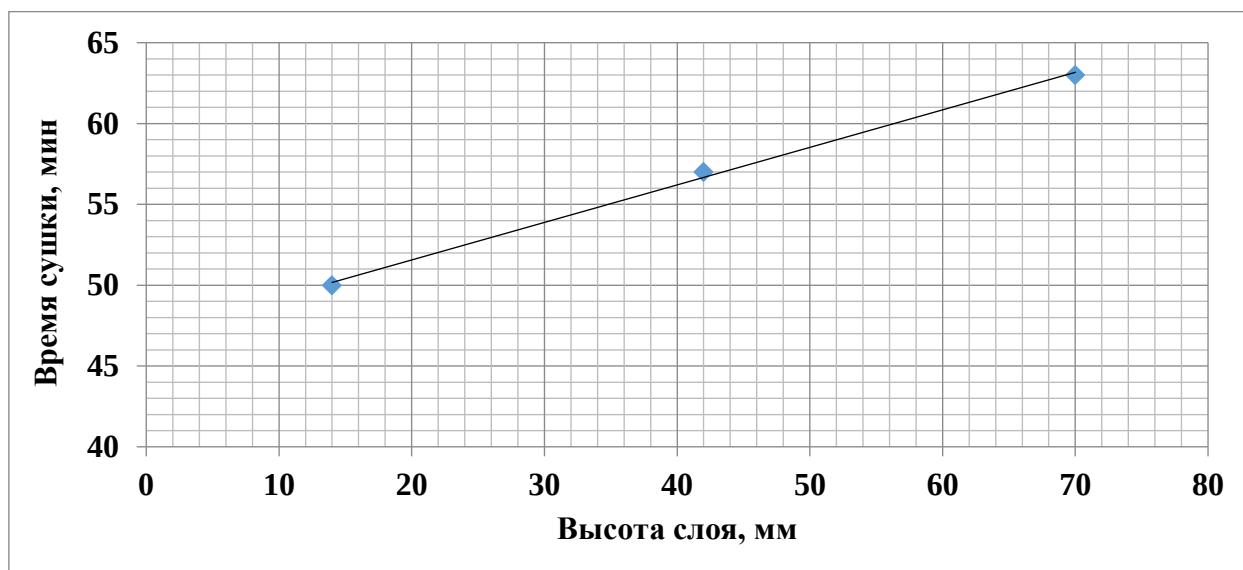


Рисунок 3. Зависимость времени сушки зерна от высоты слоя

В результате математического анализа данных (рисунок 3), выполненного средствами MS Excel, получена линейная зависимость для определения времени сушки пшеницы в зависимости от высоты слоя зерна:

$$\tau = 0,2321 \times h + 46,917, \quad (1)$$

где τ – время сушки, мин; h – высота слоя зерна, мм. Коэффициент детерминации зависимости (1) составил 0,998.

Кривые сушки (рисунок 2) обработаны с использованием методики, представленной в работе [11], и получены кривые скорости сушки для нижней, средней и верхней сушильных камер (рисунок 4). Из графика видно, что скорость сушки в нижней камере на протяжении всего процесса сушки выше скорости сушки в средней и верхней камерах. Анализ характера изменения кривых сушки и кривых скорости сушки (рисунки 2 и 4) показывает, что во всех сушильных камерах в течение двух минут скорость сушки резко возрастает до своего максимального значения. В течении этого времени идёт прогрев зёрен пшеницы, и с их поверхность удаляется механически связанная влага. Затем наступает второй период падающей скорости сушки. Для второго периода характерно удаление внутренней влаги зёрен. По мере удаления внутренней влаги давление водяного пара над поверхностью зёрен уменьшается, приближаясь в пределе к величине парциального давления паров воды в сушильном агенте. Движущая сила процесса сушки уменьшается, приближаясь к нулю, и поэтому скорость процесса так же приближается к нулю. Таким образом, при сушке пшеницы после прогрева зёрен первый период сушки практически отсутствует, а процесс протекает во втором периоде сушки (рисунок 4).

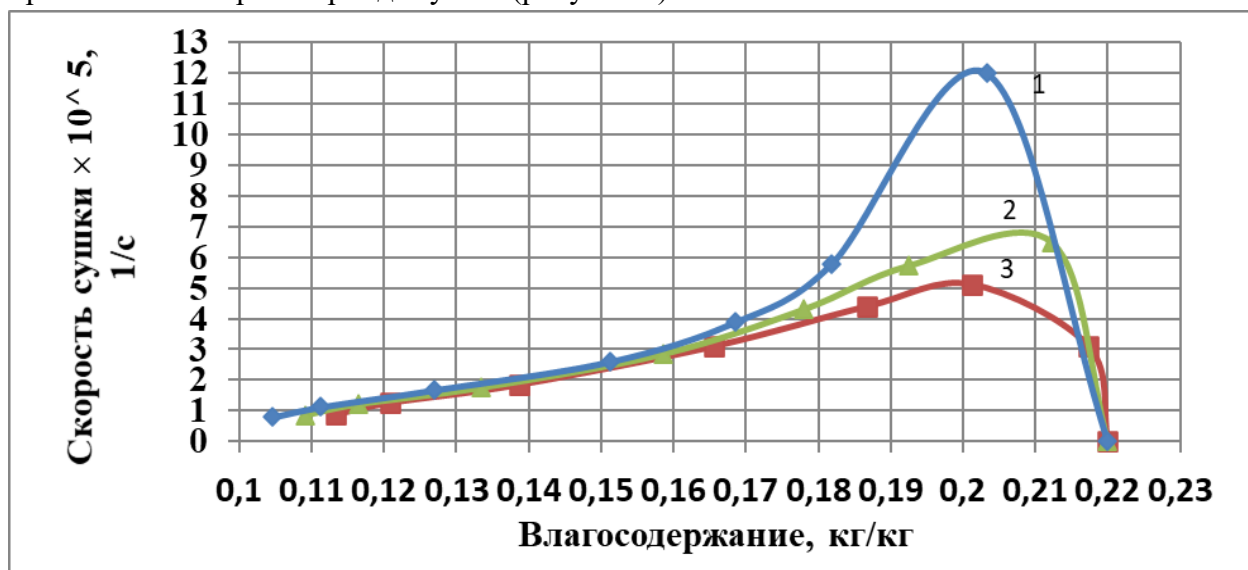


Рисунок 4. Кривые скорости сушки зерна пшеницы для сушильных камер:
1 – нижняя; 2 – средняя; 3 – верхняя

По данным рисунка 4 определены максимальные скорости сушки для всех сушильных камер. Построена графическая зависимость максимальной скорости сушки от высоты слоя зерна в каждой сушильной камере (рисунок 5).

Из рисунка видно, что с увеличением высоты слоя зерна, скорость сушки снижается. В результате математического анализа данных, выполненного средствами MS Excel, получена зависимость для определения максимальной скорости сушки зерна пшеницы в зависимости от высоты слоя:

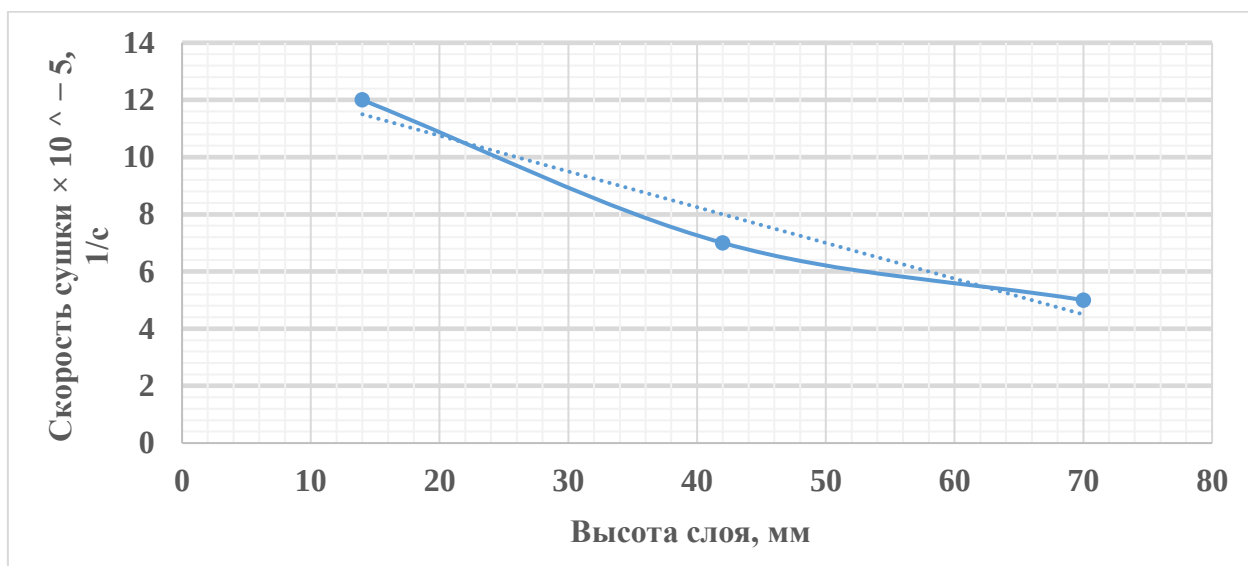


Рисунок 5. Зависимость максимальной скорости сушки от высоты слоя зерна

$$N_{\max} = (-0,125 \times h + 13,25) \times 10^{-5}, \quad (2)$$

где $N_{\max}$ – максимальная скорость сушки $\times 10^{-5}$, 1/с; h – высота слоя зерна, мм. Коэффициент детерминации зависимости (2) составил 0,9962.

С помощью кривых сушки всех сушильных камер (рисунок 2) определены значения влагосодержания зерна в каждом слое за 49 минут сушки. Влагосодержание зерна в нижнем слое достигает 0,12 кг/кг, в среднем слое – 0,1258 кг/кг и в верхнем слое – 0,1305 кг/кг. На основании этих данных построена графическая зависимость влагосодержания зёрен от высоты слоя (рисунок 6). Из рисунка следует, что с увеличением высоты слоя, влагосодержание зерна увеличивается по прямолинейной зависимости. Математический анализ зависимости выполнен средствами MS Excel, и получена формула для расчета влагосодержания зерна пшеницы в зависимости от высоты слоя:

$$U = 0,0002 \times h + 0,1176, \quad (3)$$

где U – влагосодержание зерна, кг/кг; h – высота слоя зерна, мм. Коэффициент детерминации зависимости (3) составил 0,9984.

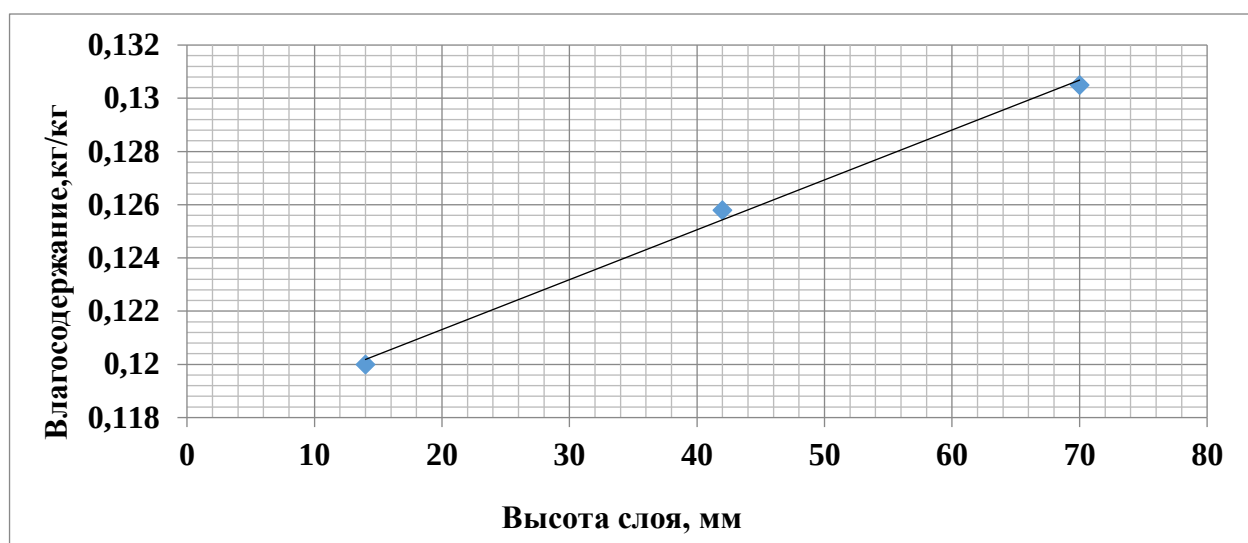


Рисунок 6. Изменение влагосодержания зерна по высоте слоя

Принимая, что зависимость (3) справедлива по всей высоте зоны сушки, то можно определить высоту зоны сушки. Поскольку верхняя граница зоны сушки – это слой зерна с влагосодержанием близким к начальному (то есть процесс сушки в этом слое не начался). Поэтому предельную высоту высушиваемого слоя определим из зависимости (3) приняв $U = 0,22$ кг/кг. То есть: $0,22 = 0,0002 h + 0,1176$. Из этого равенства следует, что высота зоны сушки $h = 512$ мм. Время сушки слоя зерна высотой 512 мм от влагосодержания 0,22 кг/кг до влагосодержания 0,12 кг/кг согласно зависимости (1) составит 166 минут. Однако, нижерасположенные слои будут пересушены. Для исключения пересушки зерна предложен следующий способ сушки. Как только самый нижний слой зерна высох до влагосодержания 0,12 кг/кг, необходимо его удалить из зоны сушки. Время сушки первого слоя, согласно зависимости (1), составит 50 минут. На его место, под действием силы тяжести, опустится вышерасположенный слой. Время сушки второго слоя, согласно зависимости (1), составит 56,7 минут. Таким образом через 6,7 минуты второй слой досохнет до 0,12 кг/кг и его тоже следует удалить из зоны сушки.

Непрерывно удаляя слои зерна с влагосодержанием 0,12 кг/кг, а на самый верх слоя высотой 512 мм добавляя такое же количество влажного зерна, будет осуществляться непрерывная сушка неподвижного слоя зерна. При этом из сушилки будет непрерывно выгружаться зерно с постоянным влагосодержанием. Погрешность влагосодержания получаемого зерна зависит от высоты удаляемого слоя. Так для высоты удаляемого слоя 28 мм, согласно формулы (3), нижняя часть этого слоя ($h=0$) имеет влагосодержание 0,1176 кг/кг, а верхняя часть ($h=28$) – 0,1232 кг/кг. Таким образом, диапазон рассеяния влагосодержания выгружаемого зерна невелик и составляет всего лишь 0,0058 кг/кг, что практически обеспечивает постоянство высушенного зерна по конечному влагосодержанию. При этом среднее значение влагосодержания удаляемого слоя зерна составит 0,1204 кг/кг, что практически равно 0,12 кг/кг.

Выводы

1. Получены кинетические кривые сушки и кривые скорости сушки для трёх неподвижных слоёв пшеницы с начальным влагосодержанием $U = 0,22$ кг/кг, которые расположены друг над другом.
2. Установлены зависимости для определения времени сушки и влагосодержания зерна пшеницы в зависимости от высоты слоя.
3. Определена предельная высота зоны сушки 0,512 м и время сушки зерна этой высоты 166 мин.
4. Предложен новый способ непрерывной сушки вертикального неподвижного слоя зерна, который обеспечивает на выходе из сушилки постоянное среднее по величине влагосодержание $U = 0,1204$ кг/кг.

Список литературы

1. Загоруйко М. Г., Павлов С. А. Исследование кинетики досушки зерна на складе // Аграрный научный журнал. 2020. № 12. С. 87–89. doi: 10.28983/asj.y 2020i12pp87-89. EDN SIDKZL.
2. Павлов С.А., Левина Н.С., Лукин И.Д. Исследование сушки селекционных семян в плотном слое // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. 12(1): С. 22 - 26. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-1-22-26>.
3. Карпенко Г. В., Курдюмов В. И., Павлушин А. А., Карпенко М. А. Особенности процесса сушки зерна пшеницы в элементарном слое. // Пермский аграрный вестник. 2021. №4 (36). С.4 – 13. doi: 10.47737/2307-2873_2021_36_4.

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. 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.
6. Остриков А. Н., Копылов М. В., Медведков Е. Б., Аскаров А. Д., Нурахметов Б. К. Исследование процесса активного вентилирования зерна в послеуборочный период // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15. № 2(73). С. 28 – 38. DOI: 10.53914/issen 2071 – 2243_2022_2-28.
7. Козлов А.В., Шевченко М.В., Горбунова Л.Н., Дубкова Е.С. Исследование возможности регулирования и автоматической оптимизации системы управления камерной зерносушилки [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно- производственный журнал. 2021. №4. Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/4/st_406.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/20214406>.
8. Богомолов, И. С., Клейменова, Н. Л., Копылов, М. В. Исследование процесса сушки зерновых культур // Ползуновский вестник. 2021 № 4 С. 14-19. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.002.
9. Савич Н.М. К вопросу определения оптимальных параметров установок активного вентилирования льновороха. // Сб. науч. Трудов ЦНИИМЭСХ. – Минск, 1968. – С. 236-247.
10. 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>.
11. Протасов, С.К. Послойное исследование кинетики сушки зерна в неподвижном слое. / С.К.Протасов, А.А. Боровик, А.М. Брайкова // Мичуринский агрономический вестник, 2024. №2. С. 6 – 13.
12. Захachatнов В.Г. Моделирование процесса сушки зерна в неподвижном слое // Южно-Уральский государственный аграрный университет. 2021. Т.28. № 2. С. 217-221. EDN: VINDLE.
13. Богданов С. И., Дармания А. П., Маркин М. А. Исследование и математическое моделирование кинетики сушки зерна озимой пшеницы. // Известия Нижневолжского агро-университетского комплекса. 2022. 2(66). С. 439-448. doi: 10.32786/2071-9485-2022-02-54. END JLNHWI.
14. Загоруйко М. Г., Бельшкшина М. Е., Марин Р. А., Башмаков И. А. Обоснование математических моделей переменного теплоподвода при сушке зерна // Аграрный научный журнал. 2021. № 11. С. 87–92. <http://dx.doi.org/10.28983/asj. y2021i11pp87-92>.
15. Воронова Е.В., Павлов И.О., Гладких Т.В. Результат моделирования процесса сушки дисперсных сред. // Вестник СГТУ. 2012. № 3 (67). С. 207-211.

Протасов Семен Корнеевич, кандидат технических наук, доцент. Белорусский государственный экономический университет
 220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Калиновского, д. 58
 Телефон: +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: borovickandrew@yandex.by

Брайкова Алла Мечиславовна, кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой физикохимии материалов и производственных технологий. Белорусский государственный экономический университет
 220117, Республика Беларусь, г. Минск, пр. им. газеты «Звезда», д. 28
 Телефон: +375172097989
 E-mail: braitkova_am@bseu.by

Базыльчук Татьяна Андреевна, кандидат технических наук. Белорусский государственный экономический университет
 220070, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Партизанский 26
 Телефон: +375172097989
 E-mail: bazylchuk_t@bseu.by