

Обоснование математических моделей переменного теплоподвода при сушке зерна

Михаил Геннадьевич Загоруйко¹, Марина Евгеньевна Бельшкينا¹, Роман Александрович Марин²,
Игорь Андреевич Башмаков¹

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

²ООО «МПЦ ОКБ по теплогенераторам и сушилкам», г. Брянск, Россия
zagorujko.misha2013@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследований эффективности сушки зерна за счет снижения удельных энергозатрат, позволяющих обеспечить улучшение качества получаемой продукции и увеличение производительности сушки. Достижением результатов является математическая модель, которая основывалась на общих закономерностях тепло- и массопереноса, отражение специфических особенностей проведения исследований. Отмечено, что большинство сушилок непрерывного действия для сыпучих материалов имеет несколько зон с различными параметрами входящего и выходящего сушильного агента в процессе сушки при переменных динамических режимах.

Ключевые слова: зерно; температура; осциллирующая сушка; режим; кинетика; эксперимент; математическая модель.

Для цитирования: Загоруйко М. Г., Бельшкينا 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>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Justification of mathematical models of variable heat supply during grain drying

Mikhail G. Zagoruiko¹, Marina E. Belyshkina¹, Roman A. Marin², Igor A. Bashmakov¹

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²LLC “MPC OKB for Heat Generators and Dryers”, Bryansk, Russia
zagorujko.misha2013@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of studies of the efficiency of drying grain by reducing the specific energy consumption, allowing improving the quality of the resulting products and increasing the productivity of drying. The achievement of the results was a mathematical model, which was based on the general laws of heat and mass transfer, reflecting the specific features of the research. It is not that most continuous dryers for bulk materials have several zones with different parameters of the input and output-drying substance, which carry out drying under variable dynamic conditions.

Keywords: seed; temperature; oscillating drying; mode; kinetics; experiment; mathematical model.

For citation: Zagoruiko M. G., Belyshkina M. E., Marin R. A., Bashmakov I. A. Justification of mathematical models of variable heat supply during grain drying. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2021;(11):87–92. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i11pp87-92>.

Введение. Повышение эффективности сушки зерна обеспечивается благодаря снижению удельных энергозатрат, улучшению качества получаемого продукта и увеличению удельной производительности сушилок. Достижение этих целей должно опираться на математические модели процесса, основанные на общих закономерностях тепло- и массопереноса и отражающие специфические особенности его проведения.

Необходимо отметить, что все зерносушилки работают со слоем материала, приводящим к существенным различиям его характеристик и параметров сушильного агента в зависимости от состояния и толщины слоя.

Большинство сушилок непрерывного действия для сыпучих материалов имеет несколько зон с различными параметрами входящего и выходящего сушильного агента, т.е. проводят сушку при переменных динамических режимах. В сушилках циклического действия режим сушки также меняется по времени.

Методика исследований. Математическая модель процесса должна как расширять область его аналитического исследования, так и создавать научную основу решения прикладных задач. Очевидно, что практика инженерных расчетов и аналитические исследования предъявляют к ней различные требования. Они должны быть учтены при выборе типа модели, являясь по существу критерием либо их отбора из имеющихся разновидностей, либо ограничением на выбор моделей.

Тепломассоперенос в слое материала представляет собой сложный процесс и, несмотря на значительное количество проведенных исследований, проблема его математического описания до настоящего времени не решена окончательно. Поэтому представляется актуальным анализ и выбор рациональных путей разработки соответствующих моделей [3, 4, 7, 8].

Использующиеся методы математического моделирования можно разделить на три класса – аналитические, статистические и комбинированные. К первому относятся работы, основанные на решении внутренней задачи тепло-массопереноса, исследованные А.В. Лыковыми его школой [1, 5, 6].

Представляет интерес использование другого аналитического подхода – основанного на описании внешней задачи теплопереноса с использованием системы уравнений Шумана-Анцелиуса. Они широко применяются при моделировании нестационарного теплообмена, в том числе в слое сыпучего материала, состоящего из частиц малых размеров и не имеющих внутренних источников теплоты. Эти уравнения определяют взаимосвязь таких величин,



как коэффициент теплообмена, безразмерная температура в слое, длительность прогрева, высота и теплоемкость слоя, скорость и теплоемкость потока теплоносителя [9].

Для коллоидных-капиллярнопористых материалов существенную роль играют размеры, форма и ориентация пор относительно поверхности частиц. Учет этого фактора при получении количественных зависимостей весьма сложен и недостаточно разработан.

Использование аналитических методов моделирования сушки реальных материалов дополнительно осложняется тем, что интенсивность теплообмена в значительной мере определяется конфигурацией поверхности тела.

Исходя из изложенного выше, целесообразно для математического моделирования осциллирующей сушки как объекта с распределенными параметрами с целью проведения инженерных расчетов и оптимизации ее режимов поиск нетрадиционных подходов к созданию математических моделей комбинированного типа процессы переноса рассматривать с использованием интегральных значений его характеристик.

Целесообразно использовать метод идентификации, основанный на математическом аппарате, который хорошо согласуется с нестационарным характером прогрева и дискретной формой представления получаемых экспериментальных данных. Метод предусматривает построение модели путем последовательного упрощения ее наиболее сложной формы. Его достоинство – получение расчетных зависимостей для основных параметров моделируемого режима, что хорошо соответствует нестационарному характеру тепло- и массообмена.

Параметрическая идентификация и оценка применимости модели.

После того как сформулирована приближенная модель процесса: записаны дифференциальные уравнения переноса, начальные и граничные условия (а еще лучше – получены точные или приближенные решения задачи), необходимо разобраться со всеми входящими в нее коэффициентами (параметрами). Прежде всего следует привести задачу или ее решение к безразмерному виду – это всегда позволяет уменьшить число неизвестных коэффициентов. Затем, нужно провести «сортировку» параметров по степени их «определяемости». Ряд коэффициентов можно смело считать константами – их значения можно задать на основе справочной литературы. Другие являются параметрами режима (внешних условий) – начальные температура, влажность материала температура и влажность или давление окружающей среды и т.п. Значения этих величин и интервалы их изменения диктуются самой постановкой задачи. Коэффициенты, характеризующие внешний теплообмен могут быть заданы с помощью критериальных уравнений теории подобия, исходя из свойств материала и режимных параметров.

После того как решится вопрос с перечисленными тремя группами коэффициентов, останутся несколько неопределенных величин, значения которых априорно можно задать лишь с точностью до порядка. Это, как правило, коэффициенты диффузии, параметры пористой структуры материала и др., которые в дальнейшем рассматривать как параметры аппроксимирующей модели. Отсюда вытекает необходимость их экспериментального определения именно на основе принятой модели, т.е. путем решения обратной задачи [2].

Так рассматривая теплоперенос в слое зерна при осциллирующем режиме сушки, исследовать процессы переноса при нагреве и охлаждении раздельно в зерновке и в слое, кроме того, первоначально ограничиться переносом тепла, игнорируя изменение влагосодержания в зерновке. В дальнейшем осуществить переход к зерновому слою с учетом его высоты и испарения влаги, например, использованием понятия «кажущаяся» теплоемкость зерна.

Результаты исследований. Разработка математической модели теплопереноса в зерновке и слое. Предельно-допустимая температура нагрева зерна $P_{\text{нд}}$ представлена в табл. 1.

Со временем воздействие подогретого агента сушки на зерно снижается, поэтому при использовании осциллирующего режима предельно допустимую температуру увеличивают на градиент температуры $\Delta\Theta$:

$$P_{\text{нд}} = P_{\text{нд}} + \Delta\Theta, \quad (1)$$

где $P_{\text{нд}}$ – температура начала снижения семенных качеств зерна, °С; $\Delta\Theta$ – градиент температуры, °С.

И наоборот, для уменьшения потерь тепла, температуру охлажденного зерна $P_{\text{ох}}$ требуется снизить на $\Delta\Theta$:

$$P_{\text{ох}} = P_{\text{нд}} - \Delta\Theta, \quad (2)$$

Перенос тепла в пограничном слое высотой $h_{\text{н}}$ внутри зерновки возможно записать в виде уравнения:

$$\alpha\delta\eta(t_1 - P) = c \frac{dP}{d\tau_{\text{н}}}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²; δ – удельная поверхность зерна, м²/кг; η – часть выделяемой теплоты при испарении (в процессе сушки зерна с 20 до 14% $\eta \approx 0,6$), °С; t_1 – температура нагрева агента сушки, °С; P – температура зерна, °С; c – теплоемкость зерна, кДж/кг·°С; $\tau_{\text{н}}$ – длительность нагрева.

Для действительного слоя высотой h добавляем в уравнение (3) коэффициент k , равный $h/h_{\text{н}}$.

Вынеся длительность нагрева $\tau_{\text{н}}$ из уравнения (3) получим:

Таблица 1

Предельно допустимая температура нагрева зерна, °С

Колосовые культуры	40–45
Продовольственное зерно	45–50
Фуражное зерно	50–60



$$\tau_{\text{н}} = \frac{ck}{\alpha \delta \eta} \ln \frac{t_1 - P_{\text{ox}}}{t_1 - P_{\text{нд}}}, \quad (4)$$

По тому же принципу выразим длительность периода охлаждения τ_{ox} :

$$\tau_{\text{ox}} = \frac{ck}{\alpha_1 \delta \eta_1} \ln \frac{P_{\text{нд}} - t_0}{P_{\text{ox}} - t_0}, \quad (5)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи в процессе охлаждения, Вт/м²; η_1 – доля теплоты, возвращенная при охлаждении; t_0 – температура не подогретого агента сушки, °С.

Выразив температуру нагрева сушки t_1 из уравнения (4) получим:

$$t_1 = \frac{P_{\text{нд}} e^{\frac{ck}{\alpha \delta \eta} A} - P_{\text{ox}}}{e^{\frac{ck}{\alpha \delta \eta} A} - 1}, \quad \text{°С}, \quad (6)$$

где $A = \frac{ck}{\alpha \delta \eta}$.

Для определения величины не подогретого агента сушки t_0 необходимо держать интервал температур топki в заданных пределах. Топка после прекращения подачи топлива начинает остывать от максимальной температуры T_1 до минимальной T_2 под воздействием окружающей среды. Количество теплоты, находящееся в элементах теплообмена на момент отключения топki Q_1 возможно определить выражением:

$$Q_1 = G_T c (T_1 - T_2), \quad \text{кДж}, \quad (7)$$

где G_T – масса теплообменных элементов, кг; c – теплоемкость теплообменных элементов, кДж/кг·°С; T_1, T_2 – максимальная, минимальная температура теплообменных элементов топki, °С.

С течением времени топка остывает, теряя количество теплоты Q_2 , которое равняется:

$$Q_2 = KF \{T_1 - t_{\text{н}}\} \tau_{\text{ox}}, \quad \text{кДж}, \quad (8)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°С; F – площадь теплообмена, м².

Приравняв правые стороны уравнений (5, 6), имеем:

$$t_0 = \frac{G_T c (T_1 - T_2)}{KF \tau_{\text{ox}}} + t_{\text{н}}, \quad \text{°С}. \quad (9)$$

Опираясь на результаты эксперимента $T_1 \approx t_1 + (8...10)^\circ\text{С}$, а учитывая технический регламент, максимальная температура $T_2 \leq 50^\circ\text{С}$.

Вынеся из уравнения (9) длительность периода охлаждения τ_{ox} , получим:

$$\tau_{\text{ox}} = \frac{G_T c \{T_1 - T_2\} + t_{\text{н}}}{KF t_0}, \quad \text{°С}. \quad (10)$$

После запуска установки температура топki со временем $\tau_{\text{н}}$ начинает возрастать с T_2 до T_1 . По достижении температуры топki T_1 прекращают подачу теплоносителя.

Эксперимент состоял из двух этапов. Целью первого этапа было определение кинетических зависимостей периодов нагрева, охлаждения, отлежек и температуры агента сушки, в кассетах периодического действия. Целью второго этапа было определение кинетики осциллирующей сушки с отлежками и без отлежек, в том числе их влияние на экономичность и качественные показатели семян в установке непрерывного действия.

Программа-методика экспериментальных работ. Осциллирующая сушка создает наиболее благоприятное условие для сохранения качественных показателей зерна при интенсификации процесса и позволяет:

обеспечить равномерность сушки и нагрева материала менее допустимых норм по исходным требованиям на сушку; полностью исключить контактный перегрев пограничного с греющими поверхностями слоя материала и тем самым гарантировать сохранение качественных показателей;

повысить производительность сушки, по ориентировочным данным на ~15% при повышенном температурном режиме и повышенных коэффициентах тепло- и массоотдачи;

снизить энергоемкость процесса сушки за счет лучшей отработки агента сушки.

В силу отмеченных преимуществ рассмотренного способа сушки основная задача экспериментальных работ сформулирована следующим образом – проверка адекватности полученных выражений для расчета $\tau_{\text{н}}$, τ_{ox} , t_0 , t_1 и расчет длительности осциллирующей сушки, в том числе с отлежками.

Программа исследований предусматривала продувку слоя увлажненного зерна с периодами осциллирования 5, 10 и 15 мин при соотношении нагрев–охлаждение как 1:1. Исследована кинетика трех вариантов осциллирующего режима: без отлежек, с отлежками после нагрева и после охлаждения зерна, а также исследована кинетика режима сушки с постоянным теплоподводом.

Высота продуваемого слоя составила 12,5 и 25 см, зерно увлажняли до 20 и 24 %, температура агента сушки составила 50–75 °С. Исследования проведены на моделях периодического и постоянного действия, скорость агента сушки V поддерживали 0,5 м/с.





Методика исследований включала: периодическую регистрацию показателей температуры (t_1 – свежего, $t_{от}$ – отходящего агента сушки, P – зерна) и влажности (φ – относительная влажность агента сушки, W – зерна) с интервалом 2–5 мин. Сушка производилась до кондиционной влажности $14 \pm 0,5$ %. По окончании сушки определяли среднюю влажность зерна, температуру, а также их отклонение от средних значений, энергию прорастания (ГОСТ 12038-84).

Промежуточные значения влажности определяли взвешиванием кассеты с материалом с погрешностью $\pm 0,1$ г.

С использованием сушильного шкафа определяли начальную и конечную влажность зерна. Благодаря измерительному комплексу «Терем-4» определяли температуру и относительную влажность воздуха.

Температуру зерна в кассете определяли в 4 точках по высоте ртутными термометрами с погрешностью $\pm 0,3$ °С. Температуру зерна в установке непрерывного действия определяли в отобранных навесках на выходе из сушильной камеры ртутными термометрами с погрешностью $\pm 0,3$ °С. Производительность установки определяли взвешиванием навесок зерна за определенный период времени на технических весах с погрешностью $\pm 0,1$ г.

Модель периодического действия. Технологическая схема модели включает: вентилятор 1, заслонку 2, калорифер 3, диффузор 4, кассеты 5, зерно 6 (рис. 1).

Исследования проводили следующим образом: включали вентилятор 1, прогревали установку, на диффузоре размещали кассеты 5. Каждые 3-5 мин кассету снимали и взвешивали, при взвешивании определяли температуру зерна. На выходе кассеты замеряли температуру $t_{от}$, относительную влажность φ и скорость отходящего агента сушки. Используя температурный датчик с амплитудой ± 3 °С температуру входящего агента сушки удерживали постоянной

Осциллирование осуществляли отключением вентилятора.

В опытах использовали две кассеты с отличающимися размерами решет 0,12×0,06 и 0,24×0,06 мм. Для исследования изменения $t_{от}$ и φ по высоте слоя использовали кассету с тремя камерами. Технические характеристики кассет приведены в табл. 2, а режимы сушки – в табл. 3.

Модель непрерывного действия. Технологическая схема модели (рис. 2, 3) включает: вентилятор 1, задвижку 2 на вентиляторе, калорифер 3, воздухопровод 4, патрубков 5 для подключения воздухопровода 4, двухстороннюю насадку 6, выполненные под посадочные размеры патрубка 5, трехсекционный корпус 7, решета 8 и 9, бункер зерна 10, емкости для зерна 11, вибрационное устройство (использована рама вентилятора) 12, опора 13, клапан 14 измерительной комплекс 15 («Терем-4»).

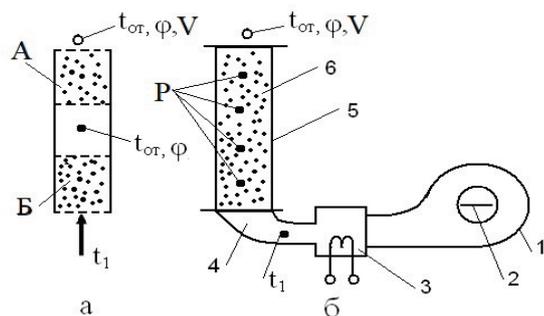


Рис. 1. Технологическая схема модели периодического действия: а – с тремя камерами; б – с одной камерой (камеры А и Б заполнены зерном)

Таблица 2

Технические характеристики

Показатель	Кассета 1	Кассета 2
Размеры решетки, мм	0,12×0,06	0,240×0,06
Вместимость, кг	1,9	4,8
Расход агента сушки, м ³ /ч	13	26
Габаритные размеры установки, м	1,0×0,5×0,6	1×0,5×1,2

Таблица 3

Режимы сушки зерна

Показатель	Величина	
	Кассета 1	Кассета 2
Исходная влажность зерна, %	20; 24	20; 24
Температура, °С агента сушки воздуха	55; 65 24; 27*	65; 75 25; 28
Период осциллирования, мин	5; 10; 15	5; 10; 15
Скорость агента сушки, м/с	~ 0,5	~ 0,5

* Приведены средние величины.

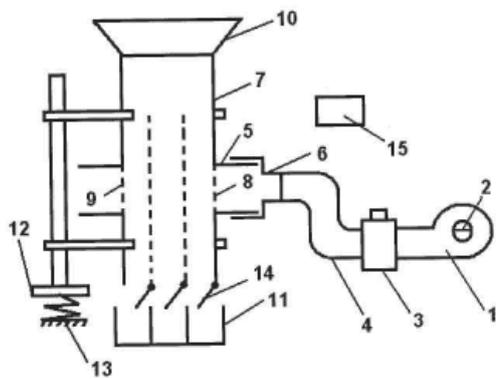


Рис. 2. Схема модели непрерывного действия



Рис. 3. Фото модели непрерывного действия

Таблица 4

Техническая характеристика модельной установки непрерывного действия

Показатель	Величина
Производительность, кг/ч	5;10
Полная вместимость, кг	3
Вместимость сушильной камеры, кг	1,0
Расход агента сушки, м ³ /ч	15
Габаритные размеры, м	1×0,5×1
Установленная мощность, кВт	2

Таблица 5

Режимы сушки зерна

Показатель	Величина
Период осциллирования, мин	5, 10, 15
Температура агента сушки, °С	65-77
Исходная влажность зерна, %	20;24
Скорость агента сушки, м/с	0,5

Работу осуществляют следующим образом: увлажненное зерно загружают в бункер 10 и заполняют корпус 7, клапаны 14 на выходе трехсекционного корпуса закрыты. Последовательно включают вентилятор 1, калорифер 3, и агент сушки подают через воздухопровод 4, патрубок 5 и насадку 6 в слой материала. После прогрева установки и материала клапанами 14 устанавливают расход материала согласно методике исследований. Осциллирование осуществляют отключением вентилятора.

Наличие вибрационного устройства 12 позволяет в широких пределах поддерживать установленный расход материала в каждой из 3 секций. По мере заполнения емкостей 11 проводится определение необходимых параметров материала, затем эти навески смешиваются (при повышенной влажности) и вновь поступают на сушку и т.д. При невысокой влажности материала (менее 20%) возможна сушка в потоке.

Техническая характеристика модельной установки непрерывного действия приведена в табл. 4, а режимы сушки зерна – в табл. 5.

Разработанная выше приближенная математическая модель процесса осциллирующей сушки зерна содержит целый ряд различных параметров. Так, из полученных выражений (4, 5) следует, что продолжительность τ_n , τ_{ox} зависит от следующих факторов:

$$\tau_n(\tau_{ox}) = \oint(c, \alpha, \alpha_1, \delta, \eta, \eta_1, P_{ox}, P'_{pd}). \quad (11)$$

Температура P_{ox} , P'_{pd} , коэффициент теплоотдачи α , доля теплоты η являются режимными параметрами процесса сушки δ – физической константой. Коэффициент теплоемкости материала c можно отнести к свойствам и состоянию зерна. Так как тепло, подводимое от газового потока к материалу, будет расходоваться на изменение энтальпии

$q_{физ}$ и на развитие процесса испарения $q_{исп}$, то кажущейся теплоемкостью материала c_k считают сумму:

$$c_k = c_{физ} + c_{исп}. \quad (12)$$

Если подстановка найденного значения в c_k расчетные уравнения даст результат, удовлетворительно согласую-



щийся с экспериментом, то модель можно использовать для анализа и расчёта.

Исследования проводили следующим образом: загружали в установку ~3 кг зерна, продували без расхода – 10 мин (при этом происходил прогрев зерна, выпускали ~1 кг зерна, находившегося в нижней части установки с последующей загрузкой их в бункер, устанавливали заданную производительность и осуществляли осциллирующую сушку. По мере заполнения опорожняли емкости для зерна, находящиеся под клапанами. В навесках, отобранных из емкостей, определяли температуру и влажность зерна. В конце опыта определяли среднюю температуру, влажность, энергию прорастания, и всхожесть высушенного зерна.

Заключение. Математическая модель теплопереноса при осциллирующей сушки основана на периодическом нагреве и охлаждении зерна с амплитудой $\pm 2-4^{\circ}\text{C}$ относительно предельно допустимой температуры, решением уравнений теплопереноса в зерновке и слое получены выражения для определения длительности периодов нагрева и охлаждения зерна, а также максимальной температуры агента сушки.

Длительности периодов нагрева и охлаждения при осциллирующей сушке зерна, подтвержденные экспериментом, составляют 5–7 и 4–6 мин соответственно.

Кинетика осциллирующего режима, как и классического, характеризуется первым и вторым периодом сушки, кривые сушки не имеют экстремальных точек, а расчет длительности процесса сушки зерна можно проводить по аналогичным формулам для процесса при постоянном теплоподводе с учетом смещения критической влажности на 1,5–2,0% в сторону снижения и «кажущейся» теплоемкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 470 с.
2. Испирян Р. А., Клиггер А. В., Пузырев Н. М., Испирян С. Р. Математическое моделирование переноса тепла и вещества при решении инженерных задач. Тверь, 2002. 100 с.
3. Сажин Б. С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.
4. Абашкин С. Н., Андреев В. П., Багров Б. О., Багров О. Н., Бажанов Л. Н., Берлин З. Л., Бойцова Н. Г. Справочник теплоэнергетика предприятий цветной металлургии. М., 1982. 456 с.
5. Загоруйко М. Г., Павлов С. А. Исследование кинетики досушки зерна на складе // Аграрный научный журнал. 2020. № 12. С. 87–89.
6. Дорохов А. С. Эффективность оценки качества сельскохозяйственной техники и запасных частей // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2015. № 1 (65). С. 31–35.
7. Shen L., Gao M., Zhu Y., Liu C., Zheng X. Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021. 70.102673.
8. Sousa T. L. D., Sousa K. A. D., Santos D. C. D., Resende O., Egea M. B. Bioingredient produced with fermentation of corn bran and «Cerrado» cashew byproduct using *Rhizopus oligosporus* and forced-air oven drying: Mathematical modeling and evaluation of quality parameters. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 2021. 26.100262.
9. Charmonkolpradit S., Somboon T., Phatchana R., Sang-Aroon W., Tanwanichkul B. Influence of drying temperature on anthocyanin and moisture contents in purple waxy corn kernel using a tunnel dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. 25. 100886.

REFERENCES

1. Lykov A. V. Theory of drying. Moscow; 1968. 470 p. (In Russ.).
2. Ispiryani R. A., Klinger A. V., Puzyrev N. M., Ispiryani S. R. Mathematical modeling of heat and substance transfer in solving engineering problems. Tver; 2002. 100 p. (In Russ.).
3. Sazhin B. S. Fundamentals of drying techniques. Moscow; 1984. 320 p. (In Russ.).
4. Abashkin S. N., Andreev V. P., Bagrov B. O., Bagrov O. N., Bazhanov L. N., Berlin Z. L., Boytsova N. G. Handbook of heat power engineering of non-ferrous metallurgy enterprises. Moscow; 1982. 456 p. (In Russ.).
5. Zagoruiko M. G., Pavlov S. A. Study of the kinetics of grain drying in a warehouse. *Agrarian scientific journal*. 2020; 12: 87–89. (In Russ.).
6. Dorokhov A. S. Efficiency of assessing the quality of agricultural machinery and spare parts. *Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2015; 1 (65): 31–35. (In Russ.).
7. Shen L., Gao M., Zhu Y., Liu C., Zheng X. Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021. 70.102673.
8. Sousa T.L.D., Sousa K.A.D., Santos D.C.D., Resende O., Egea M.B. Bioingredient produced with fermentation of corn bran and «Cerrado» cashew byproduct using *Rhizopus oligosporus* and forced-air oven drying: Mathematical modeling and evaluation of quality parameters. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 2021. 26.100262.
9. Charmonkolpradit S., Somboon T., Phatchana R., Sang-Aroon W., Tanwanichkul B. Influence of drying temperature on anthocyanin and moisture contents in purple waxy corn kernel using a tunnel dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. 25. 100886.

Статья поступила в редакцию 15.08.2021; одобрена после рецензирования 30.08.2021; принята к публикации 09.09.2021.
The article was submitted 15.08.2021; approved after reviewing 30.08.2021; accepted for publication 09.09.2021.

