

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГА СПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ
PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTION

УДК 664.73-021.465:633.1
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-3-357-367>

Поступила в редакцию 03.04.2019
Received 03.04.2019

В. А. Шаршунов, М. А. Киркор, А. В. Евдокимов

Могилевский государственный университет продовольствия, Могилев, Беларусь

**ПРОЦЕСС ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА РЖИ, ПШЕНИЦЫ
И ТРИТИКАЛЕ В КОМБИНИРОВАННОЙ СУШИЛКЕ-ДИСПЕРГАТОРЕ**

Аннотация: Одним из перспективных продуктов для получения натуральных пищевых добавок может стать измельченное пророщенное зерно различных злаковых культур до порошкообразного материала. Выбор способа механического воздействия на пророщенное зерно напрямую зависит от физико-механических свойств материала. Наиболее перспективными являются сушильно-измельчающие установки комбинированного типа на основе взаимодействия взвешенного слоя и измельчающих устройств с ножевым ротором. Это позволяет обеспечить эффективное использование деформаций сдвига и среза для получения конечного продукта заданного гранулометрического состава. В статье исследованы способы механического воздействия на пророщенное зерно и выделен наименее энергоемкий. Установлено, что для измельчения наиболее перспективными являются установки комбинированного типа. На основании проведенных исследований обоснована и практически реализована конструкция комбинированной сушилки со встроенным роторным измельчителем (сушилка-диспергатор). Для изучения процесса термомеханической обработки высоковлажного пищевого сырья спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд, позволяющий реализовывать и изучать совмещенные процессы сушки и измельчения. Рассмотрена задача построения математической модели процесса измельчения пророщенного зерна в сушилке-диспергаторе, основанная на методе Лагранжа. Предложена математическая модель процесса измельчения пророщенного зерна в аппарате с закрученными потоками на основе теории П. А. Ребиндера. Получена математическая модель упруго-пластического деформирования пророщенного зерна в условиях одноосного статического погружения. Изучена зависимость гранулометрического состава готового продукта от производительности сушилки-диспергатора, температуры сушильного агента, частоты вращения ротора измельчителя, начальной влажности пророщенного зерна. Определены критерии Фруда. Выводы и практические рекомендации будут способствовать решению задач по повышению качества, безопасности и конкурентоспособности, а также увеличению экспортных возможностей отечественной пищевой и сельскохозяйственной продукции.

Ключевые слова: злаковые культуры, биологически активные вещества, пищевые добавки, пророщенное зерно, измельчение, сушилка-диспергатор, ротор, ножи, параметры, сельскохозяйственная продукция

Для цитирования: Шаршунов, В. А. Процесс измельчения пророщенного зерна ржи, пшеницы и тритикале в комбинированной сушилке-диспергаторе / В. А. Шаршунов, М. А. Киркор, А. В. Евдокимов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2019. – Т. 57, №3. – С. 357–367. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-3-357-367>

V. A. Sharshunov, M. A. Kirkor, A. V. Evdokimov

Mogilev State University of Food Technologies, Mogilev, Belarus

**PROCESS OF CRUSHING SPROUTED GRAINS OF RYE, WHEAT AND TRITICALE
IN COMBINED DISPERSER DRYER**

Abstract: One of promising products for obtaining natural food additives can be germinated grain of various cereals crushed to powder. Selection of mechanical impact method on germinated grain directly depends on physical-and-mechanical properties of the material. The most promising are drying and grinding installations of combined type based on interaction of suspended layer and grinding devices with blade rotor. It allows to ensure efficient use of shear and cut deformations to obtain

the final product of the required particle size distribution. The paper presents results on study of mechanical impact methods on germinated grain and the least energy-intensive method is defined. It is determined that the most promising for grinding are units of combined type. Based on the research conducted, the design of combined dryer with integrated rotary chopper (dispenser dryer) has been substantiated and practically implemented. Experimental test installation was designed and manufactured to study the process of thermomechanical processing of high-moisture food raw materials. It allows to implement and study drying and grinding combined processes. Mathematical model building task for grinding process of germinated grain in dispenser dryer based on Lagrange method is considered. Mathematical model of grinding process of germinated grain in unit with twisted flow based on Reh binder theory is proposed. Mathematical model of elastic-plastic deformation of germinated grain under uniaxial static immersion is obtained. Correlation of granulometric composition of finished product with performance of dispenser dryer, temperature of drying agent, shredder rotor rotation speed, initial moisture content in germinated grain have been studied. Froude number is defined. Conclusions and practical recommendations will contribute to solving problems of improving quality, safety and competitiveness, as well as increasing export potential of domestic food and agricultural products.

Keywords: cereal crops, biologically active substances, food additives, germinated grain, grinding, dispenser dryer, rotor, blades, parameters, agricultural products

For citation: Sharshunov V. A., Kirkor M. A., Evdokimov A. V. Process of crushing sprouted grains of rye, wheat and triticale in combined dispenser dryer. *Vestsi Natsyynal'най akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2019, vol. 57, no 3, pp. 357-367 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-3-357-367>

Введение. В процессе промышленной переработки растительного сырья происходит значительная потеря содержащихся в нем биологически ценных веществ, что снижает эффект от их использования. Поэтому сегодня значительное внимание уделяется разработке новых методов и оборудования для промышленного производства натуральных высококачественных пищевых порошков из растительного сырья. Важнейшим условием переработки является получение продукта, в котором все полезные вещества находятся в естественных и сбалансированных количествах и сочетаниях [1, 2]¹.

Пророщенное зерно – ценный, легкоусвояемый продукт, содержащий в своем составе весьма широкий набор полезных веществ, витаминов, минеральных веществ, микроэлементов, а также пищевые волокна, оказывает специфическое высокоэффективное оздоравливающее воздействие на организм человека и животных.

К перспективным направлениям совершенствования технологического процесса относят совмещение в одном рабочем пространстве тепловых, массообменных и механических процессов, что обеспечивает минимальное время нахождения сырья в зоне переработки. Разработка оборудования, реализующего этот метод, позволит получать пищевые порошки с максимальным сохранением биологически активных веществ.

Процесс получения муки из пророщенного зерна совмещает несколько технологических стадий обработки, по-разному влияющих на энергозатраты. Поскольку постадийная термомеханическая обработка высоковлажных материалов требует значительных энергозатрат, то проблема оценки существующего оборудования и поиска новых подходов к переработке обеспечивающих повышение эффективности использования оборудования, является актуальной задачей [3–8].

Цель настоящей работы – исследование процесса механической переработки пророщенного зерна злаковых культур с определением структурно-механических свойств материала, а также кинематических и энергетических характеристик, влияющих на эффективность процесса измельчения.

Материалы и методы исследования. Выбор способа механического воздействия на пророщенное зерно напрямую зависит от структурно-механических свойств материала. Установлено, что для пророщенного зерна наименее энергоемкими способами измельчения являются случаи, когда материал подвергается деформациям сдвига и среза [3, 5, 6, 9, 10]². Таким образом, наиболее перспективными являются установки комбинированного типа на основе взаимодействия взвешенного слоя и измельчающих устройств с ножевым ротором [3].

¹ Саенко Ю. В. Разработка технологии и технических средств для приготовления кормовых смесей свиньям с использованием пророщенного зерна : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01. Мичуринск, 2016. 40 с.

² Борщев В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы : учеб. пособие. Тамбов : ТГТУ, 2004. 75 с.; Максимчук Б. М., Неменуший А. Ф. Опыт эксплуатации высокопроизводительных машин ударно-истирающего и ударного действия : обзор. информ. М. : ЦНИИТЭИлегпишемаш, 1983. 27 с.

Для достижения поставленной цели на базе лаборатории кафедры ПМиИГ Могилевского государственного университета продовольствия разработана и изготовлена конструкция комбинированной сушилки со встроенным роторным измельчителем (далее сушилка-диспергатор) для проведения совмещенных процессов сушки и измельчения пророщенного зерна в одном рабочем объеме, признанная изобретением³.

В сушилке-диспергаторе выделено шесть зон (рис. 1), в которых происходит сушка и измельчение частиц дисперсного материала. В зоне 0 происходит доставка зерновки в рабочую зону [11]. В зоне 1 реализуется одновременная сушка и измельчение материала. В зонах 2 и 3 осуществляется процесс сушки и транспортировки частиц вверх. Сушка и транспортировка материала происходит в зоне 4 (улитке). Сушильный агент очищается и уходит вверх в зону 6, а частицы продукта, закручиваясь, оседают в зоне 5 (циклоне), где происходит досушивание частиц.

На основе разработанной сушилки-диспергатора спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд, позволяющий изучать процесс термомеханической обработки высоковлажного пищевого сырья. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 2.

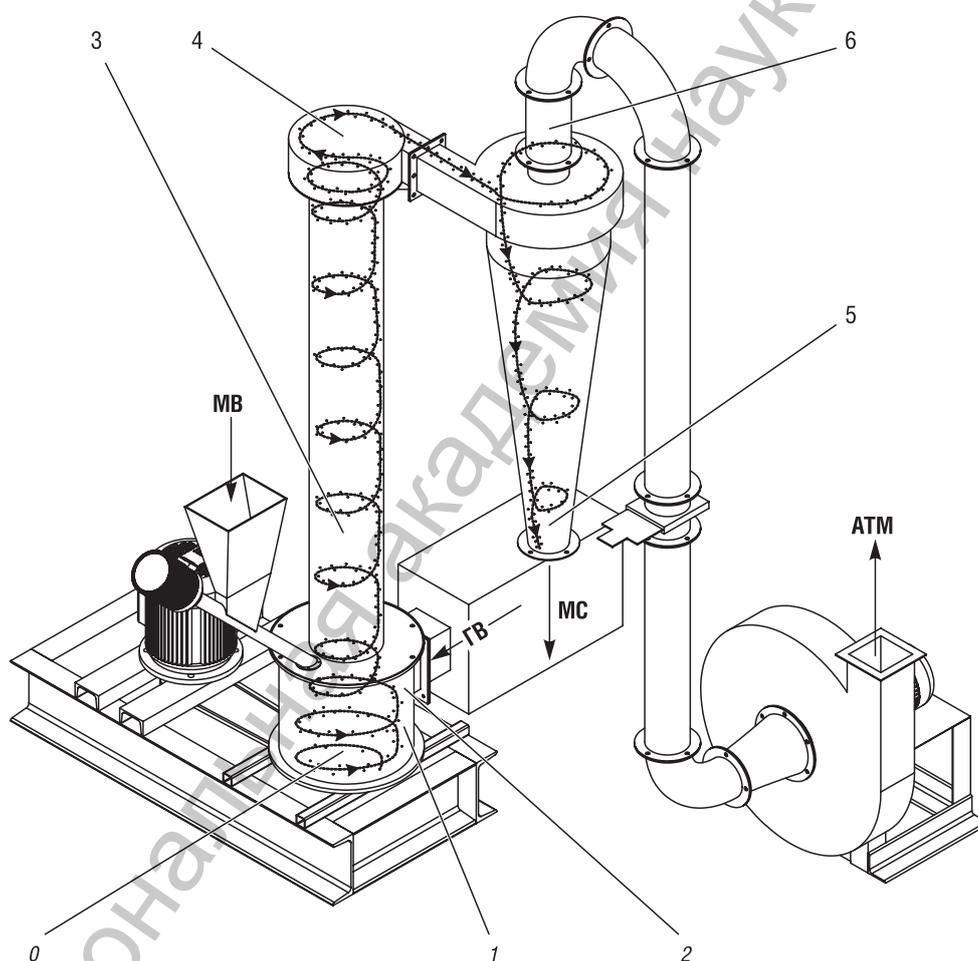


Рис. 1. Схема сушилки-диспергатора с обозначением потоков движения обрабатываемого материала и сушильного агента. Условные обозначения: ATM – отвод сушильного агента в атмосферу; GB – горячий воздух; MB – материал влажный; MC – материал сухой. Цифрами обозначены зоны обработки частиц

Fig. 1. Layout of disperser dryer with designation of flow of the processed material and drying agent. Designations: ATM – drying agent discharge to atmosphere; GB – hot air; MB – wet material; MC – dry material. Numbers indicate particle processing areas

³ Сушилка-диспергатор : пат. ВУ 12161 / В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов, А. Г. Смуленок. Опубл. 30.08.2009.

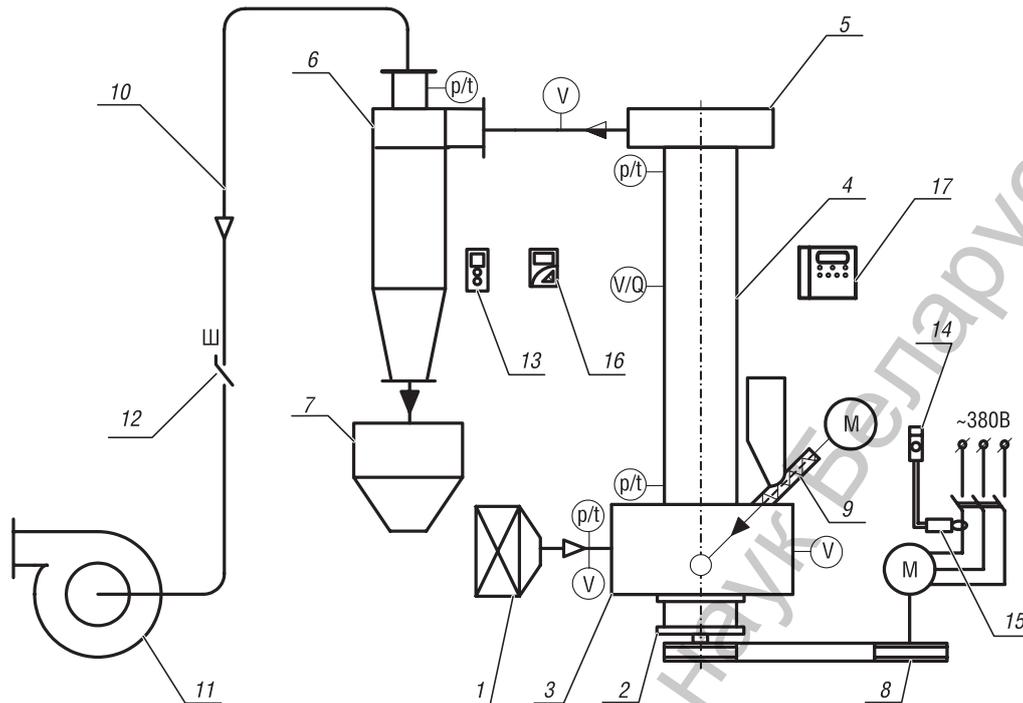


Рис. 2. Схема экспериментального стенда: 1 – калорифер; 2 – ротор; 3 – рабочая камера измельчителя; 4 – пневмотруба; 5 – раскручивающая улитка; 6 – циклон; 7 – приемный бункер; 8 – шкив; 9 – шнековый питатель; 10 – система воздухопроводов; 11 – вентилятор; 12 – шиберная заслонка; 13 – анемометр testo-435; 14 – цифровой мультиметр APPA-109N; 15 – измерительные клещи; 16 – логгер testo 177-T4; 17 – инвертор

Fig. 2. Layout of test installation: 1 – air heater; 2 – rotor; 3 – shredder working chamber; 4 – pneumatic tube; 5 – spinning snail; 6 – cyclone; 7 – receiving bunker; 8 – wheel; 9 – screw feeder; 10 – air duct system; 11 – fan; 12 – gate valve; 13 – anemometer testo-435; 14 – digital multimeter APPA-109N; 15 – measuring pliers; 16 – logger testo 177-T4; 17 – inverter

Сушилка-диспергатор работает следующим образом. Наружный воздух, проходя через систему подогрева сушильного агента 1, нагревается до температуры сушки и поступает в рабочую камеру измельчителя 3, выполненную в форме вихревой камеры. Одновременно в рабочую камеру, имеющую ротор с ножевыми рабочими элементами, подается материал шнековым питателем 9. Материал измельчается и образует в камере газовзвесь, которая находится в закрученном состоянии и удерживается в виде стационарного кольца, вращающегося у боковой стенки вокруг оси рабочей камеры 3. По мере измельчения и подсыхания частицы материала выносятся из камеры 3 в пневмотрубу 4, где происходит окончательное досушивание материала. Поток газовзвеси попадает на вход системы пылеулавливания высушенного продукта 6. Отработанный сушильный агент выбрасывается в атмосферу. Готовый продукт собирается под системой пылеулавливания высушенного продукта в бункере 7. Разряжение в установке создается вентилятором 11.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследований рассмотрена задача построения математической модели процесса измельчения пророщенного зерна в сушилке-диспергаторе, основанная на методе Лагранжа [12]. Для решения поставленной задачи составлена расчетная схема однозвенной механической системы с указанием параметров, используемых при решении уравнения Лагранжа (рис. 3).

Модель, показанная на рис. 3, представляет собой однозвенную незамкнутую кинематическую цепь, соединенную при помощи верхнего 2 и нижнего колец 3, и стержня шпильки 4 во вращающийся блок ножей 1. В конструкции колец 2 и 3 предусмотрены отверстия для стержней шпилек 4. В точке *O* находится ось вращения системы.

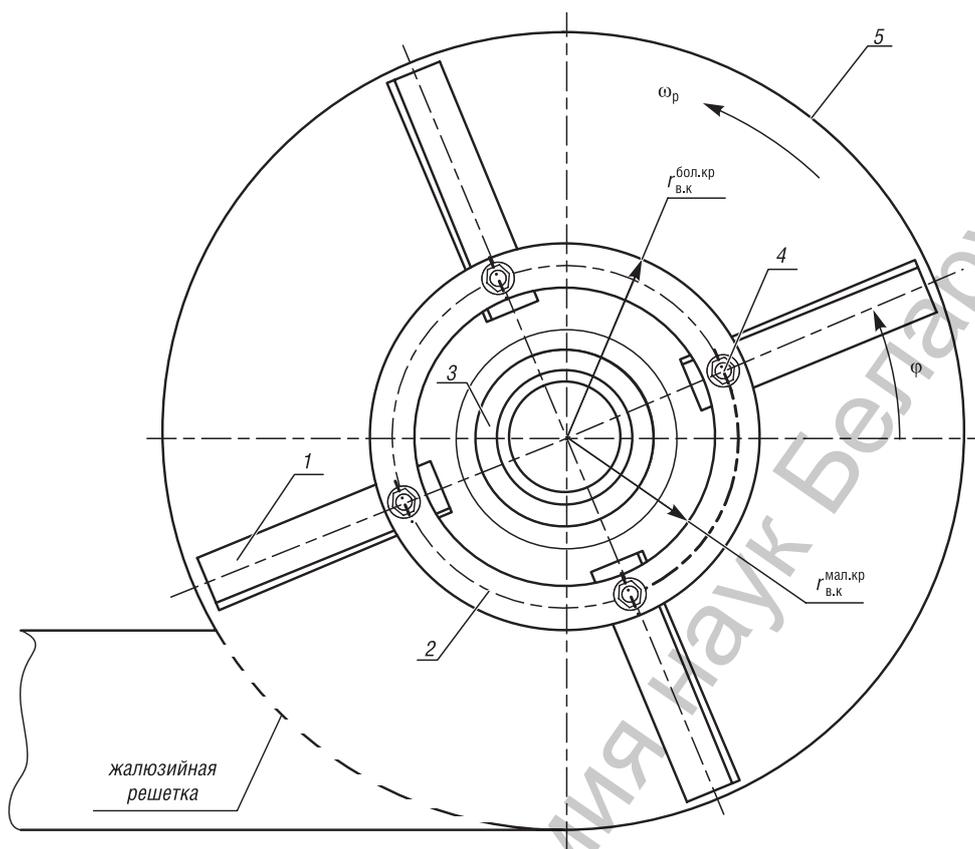


Рис. 3. Схема модели движения роторного измельчителя: 1 – блок ножей механической системы; 2 – верхнее кольцо роторного измельчителя; 3 – нижнее кольцо роторного измельчителя; 4 – соединительный стержень (шпилька); 5 – корпус камеры сушилки-диспергатора
 Fig. 3. Layout of rotor shredder movement model: 1 – block of blades of mechanical system; 2 – upper ring of the rotor shredder; 3 – lower ring of the rotor shredder; 4 – connecting rod (pin); 5 – disperser dryer chamber housing

Дифференциальное уравнение движения системы в обобщенных координатах, или уравнение Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = Q, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы, Дж; q – обобщенная координата движения системы, рад; \dot{q} – обобщенная скорость, рад/с; Q – обобщенная сила, соответствующая координате q , Н·м.

После необходимых преобразований уравнение Лагранжа второго рода принимает такой вид:

$$\ddot{\phi} - Y\dot{\phi}^{-1} = 0, \quad (2)$$

где Y – коэффициент, численное значение которого равно

$$Y = \frac{N}{(zkJ_z^H + J_z^{B.K} + J_z^{H.K} + zJ_z^{шп})} \quad (3)$$

($\dot{\phi}$ – угловая скорость, рад/с; $\ddot{\phi}$ – угловое ускорение, рад/с²);

$$\ddot{\phi} = \frac{M_{кр}}{zkJ_z^H + J_z^{B.K} + J_z^{H.K} + zJ_z^{шп}}, \quad (4)$$

где N – мощность ротора, Вт; $M_{кр}$ – крутящий момент, Н·м; z – число блоков (пакетов) ножей в роторном измельчителе; k – количество ножей в блоке; J_z^H – момент инерции массы ножа, кг·м²;

$J_z^{н.к}$ – момент инерции массы нижнего кольца роторного измельчителя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $J_z^{в.к}$ – момент инерции массы верхнего кольца роторного измельчителя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $J_z^{\text{шп}}$ – момент инерции массы стержня шпильки, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Выражение (2) является однорядным дифференциальным уравнением второго порядка и может быть полезно при исследовании движения ротора. Решение данного уравнения возможно численными методами (система MATHCAD).

Следующим этапом исследования являлось аналитическое определение работы внешних сил, затрачиваемой на измельчение пророщенного зерна [11].

Основной закон измельчения предложен П. А. Ребиндером и имеет такой вид:

$$A = A_v + A_f, \quad (5)$$

где A – полная работа внешних сил, Дж; A_v – работа, затрачиваемая на упругую деформацию объема разрушаемого куска материала, Дж; A_f – работа, затрачиваемая на образование новой поверхности, Дж.

Формула (5) отражает работу только на одной стадии измельчения. С учетом многократного измельчения материала в установке и уравнений, полученных в работе [11], формула (5) принимает следующий вид:

$$A = \frac{\sigma_p^2 V}{2E} n + k_f S_n = \frac{\sigma_p^2 V}{2E} \left(\frac{\lg z}{\lg r} + b \right) + k_f S_n. \quad (6)$$

Здесь σ_p – предел прочности измельчаемого материала (при сжатии), Па; V – объем измельчаемого материала, м^3 ; E – модуль упругости (при сжатии), Па; k_f – удельная поверхностная энергия, Н/м; S_n – величина вновь образованной поверхности, м^2 ; n – число повторностей приложенных нагрузок (число стадий разрушения),

$$n = \frac{\lg z}{\lg r} + b, \quad (7)$$

где z – количество частиц, на которое распадается измельчаемое тело (число конечных частиц для одной зерновки); r – кратность измельчения, $r = 3, \dots, k$ (k – любое конечное число); b – численный коэффициент, зависящий от кратности разрушения при единичном акте разрушения,

$$b = 1 - \frac{\lg 2}{\lg r}. \quad (8)$$

Проведены экспериментальные исследования по изучению структурно-механических свойств пророщенного зерна различных злаковых культур (ржи, пшеницы, тритикале) в зависимости от его температурно-влажностных характеристик в условиях одноосного статического нагружения и динамического нагружения [13–15].

На начальном этапе исследований при деформировании зерна предполагалось наличие четырех видов деформаций: мгновенноупругой $\varepsilon^{\text{му}}$, мгновеннопластической $\varepsilon^{\text{мп}}$, вязкоупругой $\varepsilon^{\text{ву}}$ и вязкопластической $\varepsilon^{\text{вп}}$.

$$\varepsilon = \varepsilon^{\text{му}} + \varepsilon^{\text{мп}} + \varepsilon^{\text{вп}} + \varepsilon^{\text{ву}}. \quad (9)$$

Установлено, что в процессе мгновенного нагружения полная деформация определяется суммой $\varepsilon^{\text{му}}$ и $\varepsilon^{\text{мп}}$ деформаций [13]. Указанное обстоятельство позволило получить уравнение для описания процесса упруго-пластического деформирования пророщенного зерна в условиях одноосного статического нагружения:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma^*} \right)} + \gamma \left[\exp \left(m \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{эксп}}} \right) \right) - 1 \right], \quad (10)$$

где γ , m , $\sigma_{\text{эксп}}$, σ^* – постоянные для данного вида пророщенного зерна; σ – текущее напряжение, Па; E_0 – модуль продольной упругости, Па.

Изучение влияния температурно-влажностных характеристик пророщенного зерна на его структурно-механические свойства показало, что с увеличением температуры нагретого воздуха пророщенные зерна пшеницы, ржи и тритикале значительно охрупчиваются, предельная деформация при разрушении уменьшается и данные тела разрушаются как упруго-хрупкие [14], прочность зерна в этом случае снижается. Установлено, что на прочностные свойства зерна температура влияет менее заметно, чем влажность.

Исследование структурно-механических свойств пророщенного зерна в условиях динамического нагружения показало, что при увеличении скорости нагружения предел прочности у всех исследуемых материалов увеличивается, а пластические свойства к моменту разрушения значительно уменьшаются [15]. Увеличение скорости нагружения приводит к увеличению работы разрушения на единицу объема A_p . Увеличение влажности материала приводит к снижению величины A_p .

Изучена зависимость гранулометрического состава готового продукта от производительности установки, температуры сушильного агента, частоты вращения ротора измельчителя, начальной влажности материала при определенных фиксированных параметрах [3, 16, 17].

На рис. 4 представлены интегральные кривые распределения частиц пророщенного зерна ржи, полученные при следующих параметрах: начальная влажность $W_{нач} = 42\%$; температура сушильного агента $t_{с.а} = 90\text{ }^\circ\text{C}$; производительность установки $G = 0,0139\text{ кг/с}$.

На основании полученных экспериментальных данных установлено следующее: увеличение частоты вращения измельчителя приводит к снижению величины медианного диаметра (δ_{50} , мкм) измельчаемых частиц (материал приближается к монофракции); повышение температуры сушильного агента приводит к уменьшению величины δ_{50} ; увеличение производительности установки влечет увеличение δ_{50} ; повышение влажности материала приводит к увеличению δ_{50} .

Изучена зависимость медианного диаметра и степени измельчения муки из пророщенного зерна в зависимости от различных технологических и режимных параметров процесса (температуры сушильного агента, начальной влажности материала и удельной производительности установки).

Для выявления зависимости медианного размера и степени измельчения от конструктивных и кинематических параметров процесса измельчения были определены значения критерия Фруда Fr (рис. 5). Зависимости получены при $W_{нач} = 39\%$ и $t_{с.а} = 90\text{ }^\circ\text{C}$.

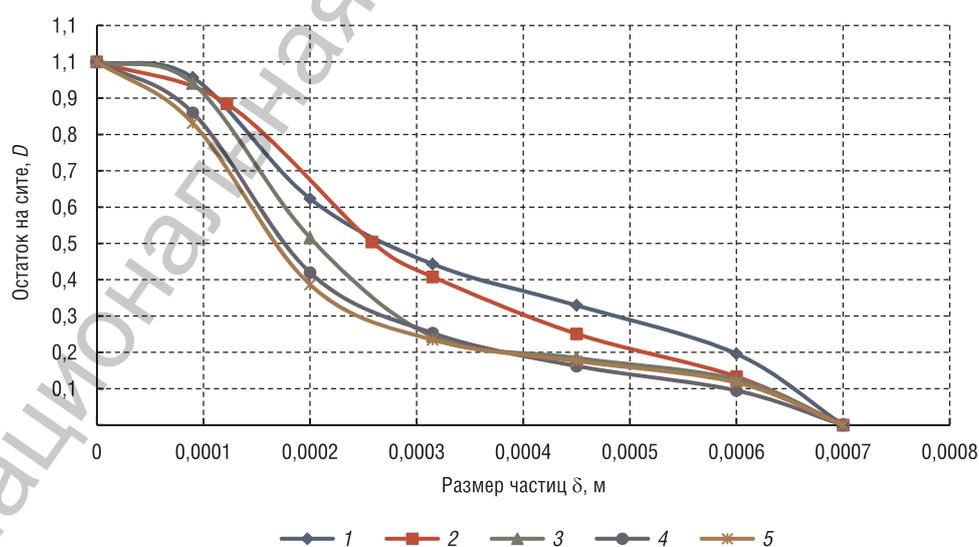


Рис. 4. Гранулометрический состав муки из пророщенного зерна ржи: 1 – частота вращения роторного измельчителя $n = 24,5\text{ с}^{-1}$; 2 – $n = 30,75\text{ с}^{-1}$; 3 – $n = 37\text{ с}^{-1}$; 4 – $n = 43,25\text{ с}^{-1}$; 5 – $n = 49,5\text{ с}^{-1}$

Fig. 4. Particle size distribution of germinated rye grain flour: 1 – rotary shredder rotation speed $n = 24.5\text{ s}^{-1}$; 2 – $n = 30.75\text{ s}^{-1}$; 3 – $n = 37\text{ s}^{-1}$; 4 – $n = 43.25\text{ s}^{-1}$; 5 – $n = 49.5\text{ s}^{-1}$

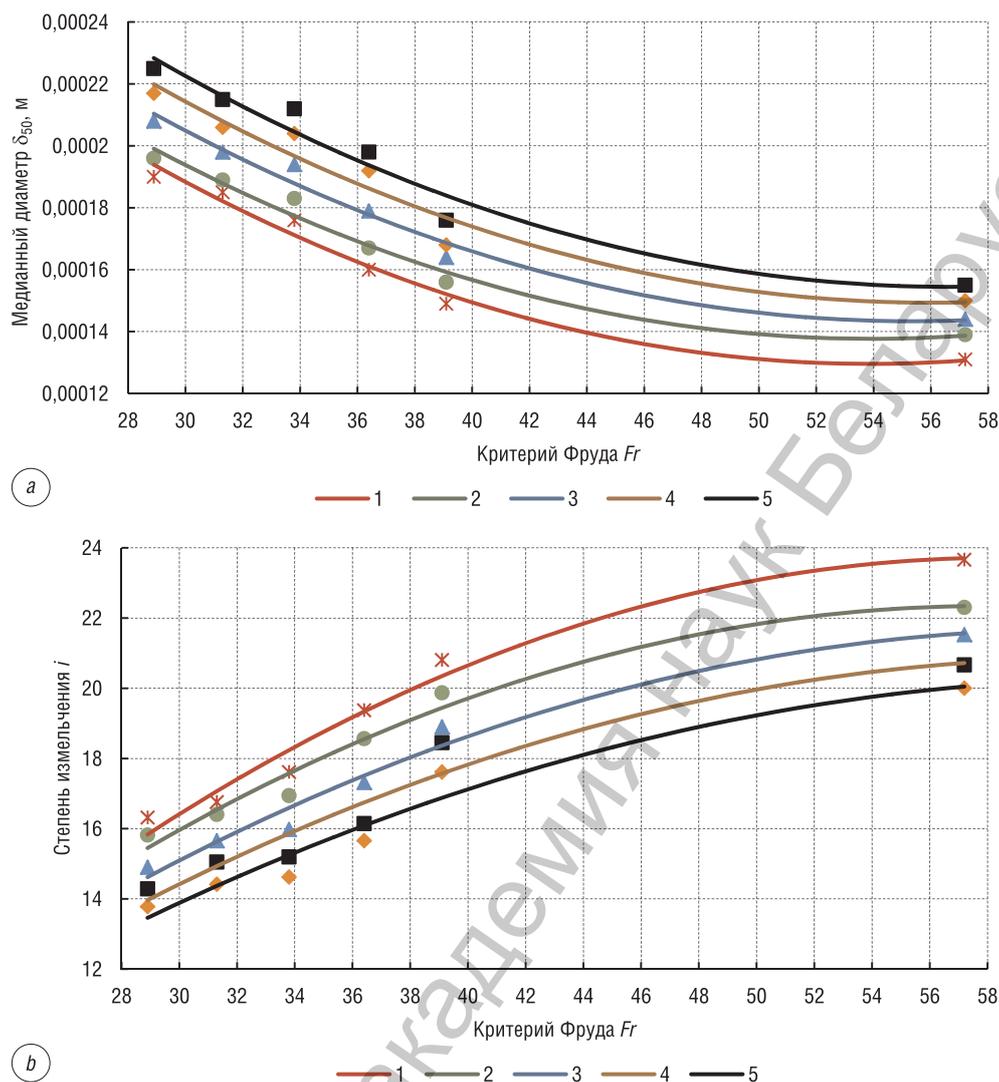


Рис. 5. Графическая зависимость медианного диаметра частиц δ_{50} (a) и степени измельчения материала i (b) от критерия Фруда Fr : 1 – производительность установки $G = 1-0,0083$ кг/с; 2 – $G = 0,0097$ кг/с; 3 – $G = 0,0111$ кг/с; 4 – $G = 0,0125$ кг/с; 5 – $G = 0,0139$ кг/с

Fig. 5. Graphic dependence of the median particle diameter δ_{50} (a) and material grinding degree i (b) on Froude number Fr : 1 – unit capacity $G = 1-0.0083$ kg/s; 2 – $G = 0.0097$ kg/s; 3 – $G = 0.0111$ kg/s; 4 – $G = 0.0125$ kg/s; 5 – $G = 0.0139$ kg/s

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что степень измельчения материала зависит от типа измельчителя, частоты вращения ротора, диаметра ротора и влажности самого материала. При уменьшении влажности измельчаемого продукта увеличивается его хрупкость и, как следствие, растет степень измельчения. При увеличении линейной скорости концов ударных элементов ротора измельчителя также растет степень измельчения [18]. Так как степень измельчения является безразмерной величиной, изучена ее зависимость от безразмерных комплексов, включающих основные влияющие параметры (критерий Фруда). Анализ зависимости степени измельчения от критерия Фруда показывает, что с ростом последнего увеличивается и степень измельчения.

Выводы

1. Предложена математическая модель процесса измельчения, основанная на методе Лагранжа, позволяющая получить уравнение движения механической системы в обобщенных координатах и определить текущее положение, углы поворота, скорость и ускорение блока ножей роторного измельчителя в любой момент времени.

2. Получены зависимости, позволяющие определить работу, затраченную на измельчение с учетом многократного характера нагружения на зерновку.

3. Установлено, что в процессе мгновенного нагружения полная деформация определяется суммой мгновенноупругой $\epsilon^{м\upsilon}$ и мгновеннопластической $\epsilon^{м\pi}$ деформаций, данное обстоятельство позволило получить уравнение для описания процесса упруго-пластического деформирования пророщенного зерна в условиях одноосного статического нагружения.

4. Получены новые экспериментальные данные по зависимости фракционного состава обрабатываемого материала от различных технологических и режимных параметров в результате термомеханической обработки.

Результаты исследований представляют интерес для предприятий, перерабатывающих зерновые культуры и изготавливающих продукты с максимальным сохранением биологически активных веществ. Важность и значимость изложенных материалов заключается в достижении социального и экономического эффекта за счет увеличения ассортимента выпускаемой хлебобулочной продукции, в котором все полезные вещества находятся в естественных и сбалансированных количествах и сочетаниях. Использование разработанного аппарата на перерабатывающих предприятиях Республики Беларусь позволит повысить интенсивность производства и интенсифицировать технологический процесс получения муки из пророщенного зерна злаковых культур, уменьшить импорт натуральных пищевых добавок растительного происхождения, что благоприятно отразится на себестоимости отечественных продуктов питания.

Список использованных источников

1. Бурова, Н. О. Особенности технологии ржано-пшеничного хлеба с сухим измельченным пророщенным зерном ржи / Н. О. Бурова, А. Г. Григорьева // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения: материалы междунар. науч.-практ. конф. / Марийск. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2015. – Вып. 17. – С. 283–284.
2. Процесс измельчения зерна пшеницы при производстве хлебобулочных изделий функционального назначения / Ю. В. Гончаров [и др.] // Технология и товароведение инновац. пищевых продуктов. – 2015. – №4 (33). – С. 41–47.
3. Шаршунов, В. А. Разработка направлений совершенствования оборудования для получения порошковых пищевых добавок из пророщенного зерна / В. А. Шаршунов, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2009. – №4. – С. 114–119.
4. Шаршунов, В. А. Расчет параметров влагообмена при термомеханической обработке пророщенного зерна в комбинированной сушилке-диспергаторе / В. А. Шаршунов, А. А. Смоляк, А. В. Евдокимов // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2012. – №1. – С. 109–114.
5. Наумов, И. А. Совершенствование кондиционирования и измельчения пшеницы и ржи / И. А. Наумов. – М.: Колос, 1975. – 175 с.
6. Жислин, Я. М. Оборудование для производства комбикормов, обогатительных смесей и премиксов / Я. М. Жислин. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Колос, 1981. – 319 с.
7. Вендин, С. В. Разработка средств механизации для измельчения пророщенного зерна на витаминный корм свиньям / С. В. Вендин, Ю. В. Саенко // Вестн. Всерос. науч.-исслед. ин-та механизации животноводства. – 2017. – №3 (27). – С. 33–38.
8. Вендин, С. В. Дробилка для измельчения пророщенного зерна / С. В. Вендин, Ю. В. Саенко // Сел. механизатор. – 2017. – №8. – С. 30–31.
9. Вендин, С. В. К расчету конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна к обоснованию расчета аппарата вторичного измельчения дробилки / С. В. Вендин, Ю. В. Саенко // Роль аграрной науки в развитии АПК РФ: материалы междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 1–2 нояб. 2017 г. / Воронеж. гос. аграр. ун-т; редкол.: Н. И. Бухтояров [и др.]. – Воронеж, 2017. – Ч. 1. – С. 137–142.
10. Вендин, С. В. К расчету конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна / С. В. Вендин, Ю. В. Саенко // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2018. – №1 (17). – С. 16–32.
11. Математическое моделирование процессов измельчения досушенного пророщенного зерна / В. А. Шаршунов [и др.] // Вестн. Могилев. гос. ун-та продовольствия. – 2016. – №2 (21). – С. 95–106.
12. Исследование динамики движения элементов роторного измельчителя в сушилке-диспергаторе / В. А. Шаршунов [и др.] // Вестн. Могилев. гос. ун-та продовольствия. – 2014. – №2. – С. 97–104.
13. Курилович, Н. Н. Исследование структурно-механических свойств пророщенного зерна / Н. Н. Курилович, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // Вестн. Могилев. гос. ун-та продовольствия. – 2008. – №2. – С. 119–127.
14. Курилович, Н. Н. Влияние температурно-влажностных характеристик пророщенного зерна на его структурно-механические свойства / Н. Н. Курилович, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // Зернові продукти і комбикорми. – 2009. – №3. – С. 14–17.
15. Влияние скорости деформирования и ударного действия нагрузки на структурно-механические характеристики пророщенного зерна / В. А. Шаршунов [и др.] // Научна конференция с международно участием «Хранителна

наука, техника и технологии 2010» : науч. трудове, Пловдив, 15–16 окт. 2010 / Унив. по хранителни технологии. – Пловдив, 2010. – Т. 57, св. 2. – С. 401–407.

16. Евдокимов, А. В. Экспериментальные исследования совмещенного процесса сушки и измельчения пищевых материалов / А. В. Евдокимов, В. А. Шуляк, М. А. Киркор // Научная конференция с международно участием «Хранительная наука, техника и технологии 2008» : науч. трудове, Пловдив, 24–25 окт. 2008 г. / Унив. по хранителни технологии ; ред.: Г. Вълчев [и др.]. – Пловдив, 2008. – Т. 55, св. 2. – С. 212–218.

17. Евдокимов, А. В. Влияние режимных и технологических параметров работы сушилки-диспергатора на процесс термомеханической обработки пророщенного зерна / А. В. Евдокимов // Актуальные проблемы и современные технологии производства продуктов питания : сб. тр. междунар. науч.-практ. конф., Кутаиси 12–13 июня 2014 г. / Гос. ун-т им. А. Церетели ; редкол.: М. Силагадзе [и др.]. – Кутаиси, 2014. – С. 350–353.

18. Вендин, С. В. Обоснование частоты вращения ножей дробилки пророщенного зерна / С. В. Вендин, С. А. Булавин, Ю. В. Саенко // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2015. – №4. – С. 9–12.

References

1. Burova N. O., Grigor'eva A. G. Technological features of rye-wheat bread production with dry milled germinated rye grains. *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyai-stva: Mosolovskie chteniya : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Topical issues of improving the technology of production and processing of agricultural products: Mosolovskie readings: proceedings of the international scientific-practical conference]. Yoshkar-Ola, 2015, iss. 17, pp. 283–284 (in Russian).

2. Goncharov Yu. V., Koryachkin V. P., Goncharovskii D. A., Panenkova A. S., Makogon D. A. Crushing of grain in production bakery goods of a functional purpose. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov = Technology and the study of merchandise of innovative foodstuffs*, 2015, no. 4 (33), pp. 41–47 (in Russian).

3. Sharshunov V. A., Shulyak V. A., Evdokimov A. V. Developing the directions of perfection of equipment for preparing powder food additives from sprouted grains. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2009, no. 4, pp. 114–119 (in Russian).

4. Sharshunov V. A., Smolyak A. A., Evdokimov A. V. Calculation of moisture exchange parameters in the process of thermomechanical treatment of grains in a combined dryer-dispersator. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2012, no. 1, pp. 109–114 (in Russian).

5. Naumov I. A. *Improving the conditioning and grinding of wheat and rye*. Moscow, Kolos Publ., 1975. 175 p. (in Russian).

6. Zhislin Ya. M. *Equipment for the production of compound feeds, fortifiers and premixes. 2nd ed.* Moscow, Kolos Publ., 1981. 319 p. (in Russian).

7. Vendin S. V., Saenko Yu. V. The development of germinated grains grinding mechanization tools for pigs' vitamin feed. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva* [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Livestock Mechanization], 2017, no. 3 (27), pp. 33–38 (in Russian).

8. Vendin S. V., Saenko Yu. V. *Crusher for grinding sprouting grain. Sel'skii mekhanizator = Selskiy Mechanizator*, 2017, no. 8, pp. 30–31 (in Russian).

9. Vendin S. V., Saenko Yu. V. To the calculation of the design parameters of knives for grinding sprouted grain to justify the calculation of the apparatus of secondary grinding crusher. *Rol' agrarnoi nauki v razvitiy APK RF: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Voronezh, 1–2 noyabrya 2017 g.* [The role of agrarian science in the development of the agro-industrial complex of the Russian Federation: proceedings of the international scientific-practical conference, Voronezh, November 1–2, 2017]. Voronezh, 2017, pt. 1, pp. 137–142 (in Russian).

10. Vendin S. V., Saenko Yu. V. To calculation of constructive parameters of knives for milling the propelled grain. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy = Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives*, 2018, no. 1 (17), pp. 16–32 (in Russian).

11. Sharshunov V. A., Evdokimov A. V., Pokatilov A. E., Popov V. N. Mathematical modeling of grinding processes of dried germinated grain. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo universiteta prodovol'stviya* [Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies], 2016, no. 2 (21), pp. 95–106 (in Russian).

12. Sharshunov V. A., Evdokimov A. V., Pokatilov A. E., Popov V. N. Research of the dynamics of movement of elements of a rotary chopper in a dryer-disperser. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo universiteta prodovol'stviya* [Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies], 2014, no. 2, pp. 97–104 (in Russian).

13. Kurilovich N. N., Shulyak V. A., Evdokimov A. V. The study of structural and mechanical properties of germinated grain. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo universiteta prodovol'stviya* [Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies], 2008, no. 2, pp. 119–127 (in Russian).

14. Kurilovich N. N., Shulyak V. A., Evdokimov A. V. Influence of temperature and humidity characteristics of germinated grain on its structural and mechanical properties. *Zernovi produkti i kombikormi = Grain Products and Mixed Fodder's*, 2009, no. 3, pp. 14–17 (in Russian).

15. Sharshunov V. A., Kurilovich N. N., Shulyak V. A., Evdokimov A. V. Influence of deformation speed and impact load on the structural-mechanical characteristics of germinated grain. *Nauchna konferentsiya s mezhdunarodno uchastie "Khranitelna nauka, tekhnika i tekhnologii 2010": nauchni trudove, Plovdiv, 15–16 oktombri 2010 = Food science, engineering and technologies 2010: science works, Plovdiv, October 15–16, 2010*. Plovdiv, 2010, vol. 57, iss. 2, pp. 401–407 (in Russian).

16. Evdokimov A. V., Shulyak V. A., Kirkor M. A. Experimental studies of the combined process of drying and grinding food materials. *Nauchna konferentsiya s mezhdunarodno uchastiem "Khranitelna nauka, tekhnika i tekhnologii 2008": nauchni trudove, Plovdiv, 24–25 oktombri 2008 = Food science, engineering and technologies 2008: science works, Plovdiv, October 24–25, 2008*. Plovdiv, 2008, vol. 55, iss. 2, pp. 212–218 (in Russian).

17. Evdokimov A. V. Influence of regime and technological operation parameters of a dryer-dispersant on the process of thermomechanical processing of germinated grain. *Aktual'nye problemy i sovremennye tekhnologii proizvodstva produktov pitaniya: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Kutaisi 12–13 iyunya 2014 g.* [Actual problems and modern technologies of food production: a collection of works of the International scientific and practical conference, Kutaisi, June 12–13, 2014]. Kutaisi, 2014, pp. 350–353 (in Russian).

18. Vendin S. V., Bulavin S. A., Saenko Yu. V. On the justification of design-mode parameters chopper sprouted grains. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva* [Mechanization and Electrification of Agriculture], 2015, no. 4, pp. 9–12 (in Russian).

Информация об авторах

Шаршунув Вячеслав Алексеевич – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры охраны труда и экологии, Могилевский государственный университет продовольствия (пр. Шмидта, 3, 212027, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: mgup@mogilev.by

Киркор Максим Александрович – кандидат технических наук, доцент, ректор, Могилевский государственный университет продовольствия (пр. Шмидта, 3, 212027, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: mgup@mogilev.by

Евдокимов Александр Владимирович – старший преподаватель, Могилевский государственный университет продовольствия (пр. Шмидта, 3, 212027, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: evdokimov.mgup@mail.ru

Information about authors

Sharshunov Vyacheslav A. - Corresponding Member of NAS of Belarus, D.Sc. (Engineering), Professor. Mogilev State University of Food Technologies (3, Schmidt Ave, 212027 Mogilev, Republic of Belarus).

Kirkor Maksim A. - D.Sc. (Engineering), Associate Professor. Mogilev State University of Food Technologies (3, Schmidt Ave, 212027 Mogilev, Republic of Belarus).

Evdokimov Alexander V. - Mogilev State University of Food Technologies (3, Schmidt Ave, 212027 Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: evdokimov.mgup@mail.ru