

УДК 664.83

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР В СУШИЛКЕ-ДИСПЕРГАТОРЕ

В. А. ШАРШУНОВ, М. А. КИРКОР, А. В. ЕВДОКИМОВ, Е. Н. УРБАНЧИК

УО «Могилевский государственный университет продовольствия»
г. Могилев, Республика Беларусь, 212027

(Поступила в редакцию 18.03.2019)

Анализ объемов производства продуктов пищевой промышленности, показал что в настоящее время возрастает количество ассортимента, в котором используются биологически активные пищевые добавки, используемые в виде сухих порошков и улучшающие потребительские характеристики конечных продуктов. Одним из перспективных видов пищевых добавок для получения натуральных пищевых добавок является измельченное пророщенное зерно различных злаковых культур. 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 рассматриваемой статье приведены результаты исследований процесса измельчения пророщенного зерна злаковых культур на опытных образцах сушилки-диспергатора, выполненные согласно плана НИР по теме ГБ 16-01 «Процессы механо- и термообработки при получении дисперсных порошков заданного состава из материалов растительного происхождения» (№ госрегистрации 20161499).

Ключевые слова: пищевые добавки, пророщенное зерно, измельчение, сушилка-диспергатор, ротор, ножи, параметры.

Analysis of the production volumes of food industry products has shown that the number of the assortment in which biologically active food additives are used, in the form of dry powders and with improved consumer characteristics of the final products, is increasing. One of the most promising types of food additives for the production of natural food additives is crushed germinated grain of various cereals. One of the promising products for the production of natural food additives can be germinated grain of various cereals crushed to a powdered material. The choice of the method of mechanical action on germinated grain directly depends on the physical-mechanical properties of the material. The most promising are drying and grinding installations of the combined type based on the interaction of the suspended layer and grinding devices with a blade rotor. This allows you to ensure the effective use of shift and shear deformations to obtain the final product of a given granulometric composition.

This article presents results of research into the process of grinding germinated grain of cereals on the prototypes of the dryer-disperser, carried out according to the research plan for the theme GB 16-01 "Mechanical and heat treatment processes for preparing dispersed powders of a given composition from plant materials" (state registration number 20161499).

Key words: food additives, germinated grain, grinding, dryer-disperser, rotor, knives, parameters.

Введение

Выбор способа механического воздействия на пророщенное зерно напрямую зависит от физико-механических свойств материала. Установлено, что для пророщенного зерна наименее энергоемкими способами измельчения являются случаи, когда материал подвергается деформациям сдвига и среза. Таким образом, наиболее перспективными являются установки комбинированного типа на основе взаимодействия взвешенного слоя и измельчающих устройств с ножевым ротором [1].

Основная часть

На основании проведенного анализа в УО МГУП разработана конструкция комбинированной сушилки со встроенным роторным измельчителем (далее сушилка-диспергатор) для проведения совмещенных процессов сушки и измельчения пророщенного зерна в одном рабочем объеме, на конструкцию которой получен патент Республики Беларусь [2].

На основе разработанной сушилки-диспергатора спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд, позволяющий изучать процесс термомеханической обработки высоковлажного пищевого сырья. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

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 2 с ножевыми рабочими элементами, подается материал шнековым питателем 9. Материал измельчается и образует в камере газозвесь. Образовавшаяся газозвесь находится в закрученном состоянии и удерживается в виде стационарного кольца, вращающегося у боковой стенки вокруг оси рабочей камеры 3.

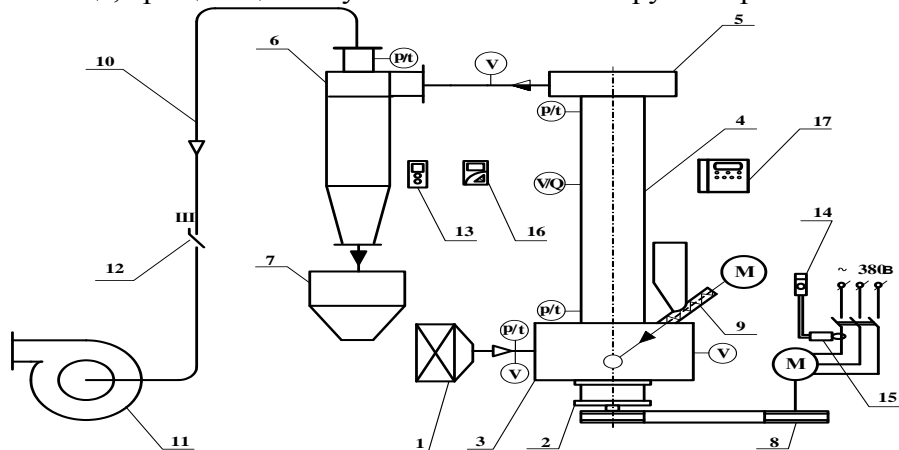


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для проведения исследований процесса измельчения пророщенного зерна
1 – калорифер; 2 – ротор; 3 – рабочая камера измельчителя; 4 – пневмотруба; 5 – раскручивающая улитка; 6 – циклон; 7 – приемный бункер; 8 – шкив; 9 – шнековый питатель; 10 система воздухопроводов;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

По мере доизмельчения и подсыхания частицы материала выносятся из камеры 3 в пневмотрубу 4, где происходит окончательное досушивание материала. Поток газозвеси 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.

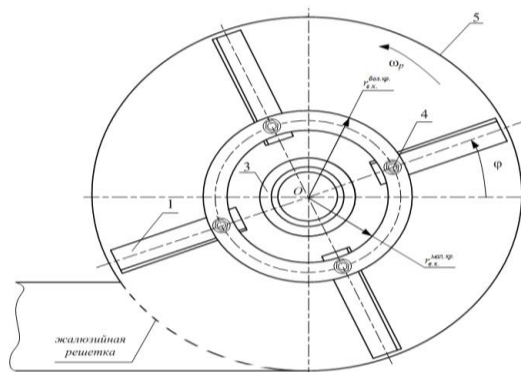


Рис. 2. Схема модели движения роторного измельчителя:

1 – блок ножей механической системы; 2 – верхнее кольцо роторного измельчителя; 3 – нижнее кольцо роторного измельчителя; 4 – соединительный стержень (шпилька); 5 – корпус камеры сушилки-диспергатора

В ходе исследований рассмотрена задача построения математической модели процесса измельчения пророщенного зерна в сушилке-диспергаторе, основанная на методе Лагранжа [4]. Для решения поставленной задачи составлена расчетная схема однозвенной механической системы с указанием параметров используемых при решении уравнения Лагранжа (рис. 2).

Модель 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 О находится ось вращения системы. Дифференциальное уравнение движения системы в обобщенных координатах или уравнение Лагранжа:

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

(1)

где T – кинетическая энергия системы; q – обобщенная координата движения системы; \dot{q} – обобщенная скорость; Q – обобщенная сила соответствующая координате q .

После необходимых преобразований уравнение Лагранжа второго рода принимает вид:

$$\ddot{\phi} - A\dot{\phi}^{-1} = 0,$$

(2)

где A – коэффициент, численное значение которого равно

$$A = \frac{N}{\left(zkJ_z^{\text{ножа}} + J_z^{\text{г.к.}} + J_z^{\text{н.к.}} + zJ_z^{\text{шп}} \right)} \quad (3)$$

где z – число блоков (пакетов) ножей в роторном измельчителе; k – число ножей в блоке; $J_z^{\text{ножа}}$ – момент инерции массы ножа; $J_z^{\text{г.к.}}$ – момент инерции массы нижнего кольца роторного измельчителя; $J_z^{\text{н.к.}}$ – момент инерции массы верхнего кольца роторного измельчителя; $J_z^{\text{шп}}$ – момент инерции массы стержня шпильки, кг·м².

Выражение (3) является однородным дифференциальным уравнением второго порядка и может быть применена при исследовании движения рабочих элементов ротора. Решение данного уравнения возможно численными методами при использовании системы МATHCAD. Следующим этапом исследования являлось аналитическое определение работы внешних сил затрачиваемой на измельчение пророщенного зерна [5]. Основной закон измельчения предложен П. А. Ребиндером и имеет вид:

$$A = A_v + A_f, \quad (4)$$

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 (4) отражает работу только на одной стадии измельчения. С учетом многократного измельчения материала и уравнения (1) формула (4) принимает вид:

$$A = \frac{\sigma_p^2 V}{2E} n + k_f S_n = \frac{\sigma_p^2 V}{2E} \left(\frac{\lg z}{\lg r} + b \right) + k_f S_n. \quad (5)$$

Проведены экспериментальные исследования по изучению структурно-механических свойств материала [6]. Изучен процесс статического деформирования пророщенного зерна различных культур (рожь, пшеница, тритикале) в зависимости от его начальной влажности.

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 $\varepsilon^{\text{ВП}}$.

$$\varepsilon = \varepsilon^{\text{МУ}} + \varepsilon^{\text{МП}} + \varepsilon^{\text{ВП}} + \varepsilon^{\text{ВУ}} \quad (6)$$

Проведенные исследования показали, что в процессе мгновенного нагружения полная деформация определяется суммой мгновенноупругой $\varepsilon^{\text{МУ}}$ и мгновеннопластической $\varepsilon^{\text{МП}}$ деформаций. Указанное обстоятельство позволило получить уравнение для описания процесса упруго-пластического деформирования пророщенного зерна в условиях одноосного статического нагружения.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma^*} \right)} + \gamma \left[\exp \left(m \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{эксп.}}} \right) \right) - 1 \right], \quad (7)$$

Изучение влияния температурно-влажностных характеристик пророщенного зерна на его структурно-механические свойства показали, что с увеличением температуры нагретого воздуха

пророщенные зерна пшеницы, ржи и тритикале значительно более хрупкими. При этом предельная деформация при разрушении уменьшается и данные тела разрушаются как упруго-хрупкие [7]. Прочность пророщенного зерна в этом случае значительно снижается. Установлено, что на прочностные свойства зерна влияние температуры сказывается менее заметно, чем влияние влажности.

Исследование структурно-механических свойства 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 [8]. 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 в зависимости от производительности установки, температуры сушильного агента, частоты вращения ротора измельчителя, начальной влажности материала при определенных фиксированных параметрах. На рис. 3 представлены интегральные кривые распределения частиц пророщенного зерна ржи полученные при следующих параметрах начальная влажность $W_{нач} = 42 \%$; температура сушильного агента $t_{c.a.} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; производительность установки $G=0,01389 \text{ кг/с}$.

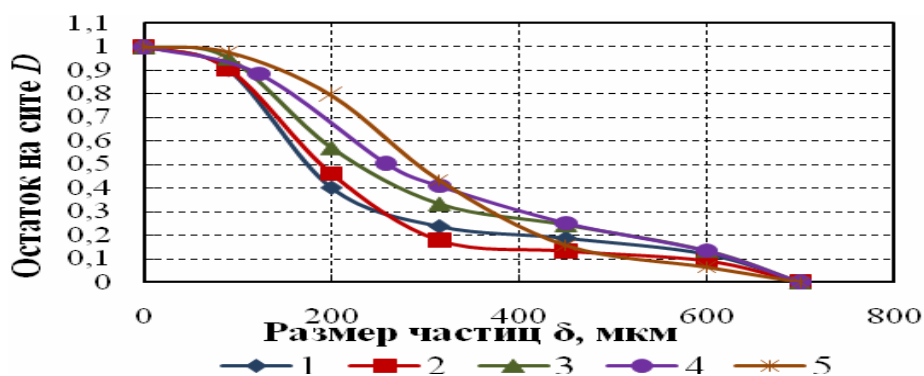


Рис. 3. Гранулометрический состав порошкообразного материала из пророщенного зерна ржи: 1 – частота вращения роторного измельчителя $n=1470 \text{ об/мин}$; 2 – 1845 об/мин ; 3 – 2220 об/мин ; 4 – 2595 об/мин ; 5 – 2970 об/мин

На основании полученных зависимостей установлено: увеличение частоты вращения измельчителя приводит к снижению величины медианного диаметра (δ_{50}) 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 пищевого порошка из пророщенного зерна в зависимости от различных технологических и режимных параметров (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. 4). Зависимости получены при $W_{нач} = 39\%$ и $t_{c.a.} = 90^\circ\text{C}$.

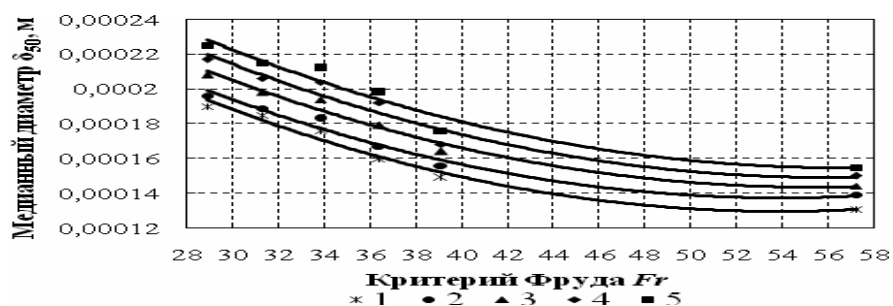


Рис. 4. Зависимость δ_{50} от Fr для подачи: 1 – 30 кг/ч; 2 – 35 кг/ч; 3 – 40 кг/ч; 4 – 45 кг/ч; 5 – 50 кг/ч

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что степень измельчения материала зависит от типа измельчителя, частоты вращения ротора, диаметра ротора и влажности самого материала [9]. 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. Так как степень измельчения является безразмерной величиной, то была исследована ее зависимость от безразмерных комплексов, включающих основные влияющие параметры (критерий Фруда). Анализ зависимости степени измельчения от критерия Фруда показывает, что с ростом последнего, растет и степень измельчения.

Проведены исследования были использованы при разработке методики инженерного расчета и проектирования опытных образцов сушилки-диспергатора пророщенного зерна злаковых культур [10]. Опытные образцы сушилки-диспергатора прошли производственную апробацию в условиях производства комбинатов хлебопродуктов и хлебозаводов.

Сотрудниками УО МГУП совместно с ОАО «Могилевхлебопродукт» были проведены исследования по сушке и измельчению пророщенного зерна ржи сорта «Верасень» на опытном образце сушилки-диспергатора. По результатам термомеханической обработки пророщенного зерна ржи сорта «Верасень» в сушилке-диспергаторе, комиссией в составе УО МГУП и ОАО «Могилевхлебопродукт» подписан и утвержден от 30.03.2010 г. в установленном порядке «Акт опытно-промышленных испытаний опытного образца сушилки-диспергатора для термомеханической обработки высоковлажных продуктов». Комиссия установила, что разработанная сушилка-диспергатор соответствует представленной документации. Состав и качество полученной муки из цельносмолотого пророщенного зерна ржи соответствует действующим техническим нормативным правовым актам.

На базе солодовой линии Горецкого филиала ОАО «Булочно-кондитерская компания «Домочай» были проведены испытания опытного образца сушилки-диспергатора при сушке и измельчении экспериментальной партии зернового продукта «BioMix» из пророщенного зерна пшеницы и овса голозерного. По результатам проведенных испытаний комиссией подписан и утвержден от 17.08.2015 г. в установленном порядке «Акт опытно-промышленных испытаний опытного образца сушилки-диспергатора для термомеханической обработки высоковлажных пищевых продуктов при производстве продукта зернового «BioMix» из пророщенного зерна пшеницы и овса голозерного». Комиссия установила, что разработанная сушилка-диспергатор соответствует представленной документации. Состав и качество полученной муки из цельносмолотого пророщенного зерна пшеницы и овса голозерного соответствует действующим техническим нормативным правовым актам.

Заключение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Для получения высокого качества прошкообразных добавок медианный диаметр его частиц должен быть равен 150–250 мкм, что может быть обеспечено при следующих оптимальных параметрах измельчителя: частота вращения роторного измельчителя должна составлять 33–43 об/с при его диаметре 245–345 мм и числе ножей 60–80 шт.

2. Экспериментально определены основные характеристики структурно-механических свойств пророщенного зерна ржи, пшеницы и тритикале сортов белорусской селекции в условиях статического нагружения при начальной влажности сырья 33–45 % и его эквивалентном диаметре 3,2–3,6 мм: модуль упругости изменяется в пределах 3–12 МПа, предел прочности – 0,6–3,0 МПа и деформация ползучести – 0,07–0,22, а также в условиях динамического нагружения при изменении значений его коэффициента в пределах от 1,0 до 13,0 определены оптимальные значения критических скоростей движения для разрушения исходного продукта в пределах от 20 до 30 м/с в зависимости от вида и сорта зерна.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Шаршунов, В. А. Разработка направлений совершенствования оборудования для получения порошковых пищевых добавок из пророщенного зерна / В. А. Шаршунов, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук – 2009. – №4. – С. 114 – 119.

2. Патент на изобретение РБ № 12161 «Сушилка-диспергатор». Заявка №20070942 от 23.07.2007 г. Положительное решение от 26.03.2009 г. Зарегистрирован 21.04.2009 г. Авторы: Шуляк В. А., Евдокимов А. В., Смузенко А. Г.

3. Шаршунов, В. А. Математическое моделирование процессов измельчения досушенного пророщенного зерна / В. А. Шаршунов, А. В. Евдокимов, А. Е. Покатилов, В. Н. Попов // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. – 2016. – №2(21) – С. 95 – 106.

4. Шаршунов, В. А. Исследование динамики движения элементов роторного измельчителя в сушилке-диспергаторе / В. А. Шаршунов, А. В. Евдокимов, А. Е. Покатилов, В. Н. Попов // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия – 2014. – № 2. – С. 97 – 104.

5. Евдокимов, А. В. Определение энергии разрушения при измельчении досушенного пророщенного зерна / А. В. Евдокимов // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. XI международная научно-техническая конференция, Могилев, 21–22 апреля, 2017 г. / Мог. гос. ун-т прод.; редкол.: А. В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 238.

6. Курилович, Н. Н. Исследование структурно-механических свойств пророщенного зерна / Н. Н. Курилович, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия – 2008. – № 2. – С. 119 – 127.

7. Курилович, Н. Н. Влияние температурно-влажностных характеристик пророщенного зерна на его структурно-механические свойства / Н. Н. Курилович, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // Зерновые продукты и комбикорма – 2009. – №3. – С. 14–17 (Украина).

8. Шаршунов, В. А. Влияние скорости деформирования и ударного действия нагрузки на структурно – механические характеристики пророщенного зерна / В. А. Шаршунов, Н. Н. Курилович, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // научна конференция с международно участие: «Хранителна наука, техника и технологии 2010:» / научни трудове Ун-т по хранит. технологии; редкол.: Г. Вълчев [и др.] – Пловдив, 15-16 окт. 2010. – том LVII, Свитък 2 – С. 401 – 407 (Болгария).

9. 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. труд. Междунар. науч.-практ. конф., Кутаиси 12-13 июня / Гос. ун-т Акакия Церетели; редкол.: М. Силагадзе [и др.]. – Кутаиси, 2014. – С.350–353 (Грузия).

10. Шаршунов, В. А. Выбор конструктивно-технологической схемы и обоснование параметров сушилки-диспергатора для производства порошковых пищевых добавок из пророщенного зерна / В. А. Шаршунов, А. В. Евдокимов // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сборник научных трудов. Вып. 1 / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Главное управление образования, науки и кадров, Учреждение образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»; ред.: В. Р. Петровец [и др.]; рец.: В. А. Успенский, В. И. Ильин, Гайдуков В. А. – Горки : БГСХА, 2014. – С. 31 – 41.