

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ И ЭКВИВАЛЕНТНОГО ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ПРОДУКТА НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

М.А. Киркор, В.И. Никулин, А.Г. Смусенок, Р.А. Бондарев

Исследовано влияние физических характеристик измельчаемых продуктов и кинематических параметров на степень измельчения. Получены критериальные зависимости эмпирических коэффициентов в законе распределения Розина-Раммлера, с помощью которых можно прогнозировать дисперсный состав измельченных порошков. Предложено критериальное уравнение для инженерных расчетов максимального размера частиц полученных порошков и степени измельчения.

Введение

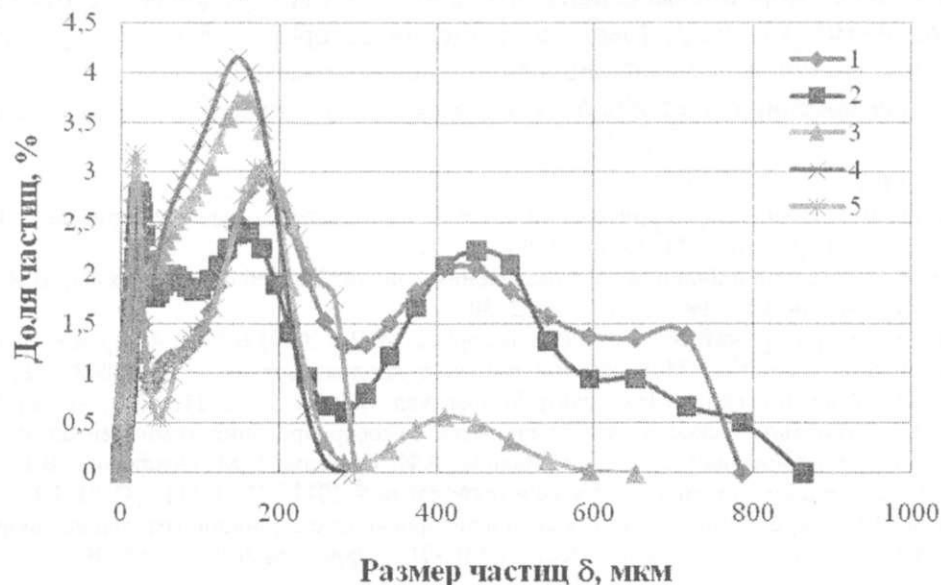
В настоящее время работу предприятий аграрной промышленности невозможно представить без применения процесса измельчения. Например, при производстве экструдированных зернопродуктов, каш быстрого приготовления для питания исходным материалом являются зерновые культуры (пшеница, рис, гречиха и др.). Помимо требований безопасности к данным продуктам предъявляют требования к максимальному размеру частиц, который не должен превышать определенного значения.

На практике часто встает вопрос об определении фракционного состава полученных порошков, а также максимального размера частиц. Затруднение вызывает отсутствие эмпирических данных по влиянию физических свойств продукта на характеристики процесса измельчения. В частности, на данный момент довольно трудоемким является теоретическое прогнозирование фракционного состава полученных порошков, а также максимального размера частиц и степени измельчения.

Результаты исследований и их обсуждение

С целью изучения процесса измельчения были проведены экспериментальные исследования по помолу зерновых культур таких как ячмень, рис, пшеница, гречиха и перловка на дисмембраторе [1] при постоянной частоте вращения ротора, равной 6500 об/мин.

На рисунке 1 представлены гранулометрические составы полученных порошков в виде дифференциальных кривых распределения частиц по размерам.



1 — ячмень; 2 — пшеница; 3 — рис; 4 — гречиха; 5 — перловка
Рисунок 1 — Дифференциальные кривые распределения частиц по размерам

Из рисунка 1 следует, что наименьшим максимальным размером частиц обладают порошки гречки и перловки, тем самым они наиболее близко приближаются к монофракции.

Для выявления влияния физических свойств продуктов (плотность и эквивалентный диаметр частиц) на такие показатели процесса измельчения, как степень измельчения, гранулометрический состав полученных порошков и их максимальный размер частиц определялось значение критерия Архимеда по выражению (1) [2] для каждого из полученных порошков в отдельности. Этот критерий характеризует соотношение сил тяжести, подъемной силы Архимеда и силы вязкостного трения, действующих на частицу дисперсного материала в потоке реальной среды в процессе измельчения:

$$Ar = \frac{g\delta_0^3\rho(\rho_{\text{ч}} - \rho)}{\mu^2}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

δ_0 – определяющий размер частицы, м ;

ρ и $\rho_{\text{ч}}$ – плотность среды и частицы соответственно, кг/м^3 ;

μ – динамическая вязкость среды, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Для удобства дальнейшего использования полученных выражений в качестве определяющего размера частицы использовался эквивалентный диаметр частиц исходного продукта. С целью его определения из зерен каждой культуры выбиралась навеска, и определялись размеры каждого зерна в отдельности. После этого (в зависимости от формы зерна) по выражениям (2–6) [3,4] определялись значения объема и среднего эквивалентного диаметра сферической частицы δ_0 . Для зерен ячменя, риса, перловки и пшеницы, имеющих форму вытянутого эллипсоида, объем определялся по выражению

$$V = \frac{4}{3}\pi ab^2, \quad (2)$$

где a и b – малая и большая полуоси эллипсоида соответственно, м .

Для зерен гречки, имеющих форму пирамиды, этот параметр определялся по выражению

$$V = \frac{1}{3} \cdot Sh, \quad (3)$$

где h – высота зерна, м ; S – площадь его основания, м^2 , которая определялась по формуле

$$S = \frac{l}{2} \cdot c \left(\frac{c}{2} \text{tg}60 \right), \quad (4)$$

где c – основание равностороннего треугольника, м .

По среднему объему исходных частиц $V_{\text{ср}}$ определяли величину эквивалентного диаметра частиц исходного продукта:

$$V_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^z V_i}{z}, \quad (5)$$

где z – число измеренных частиц.

По выражению (6) определялась величина среднего эквивалентного диаметра:

$$\delta_0 = \sqrt[3]{\frac{6V_{\text{ср}}}{\pi}}. \quad (6)$$

Полученные таким образом значения достаточно точно совпадают с данными для пшеницы и ячменя, приведенными в [5].

Для описания гранулометрического состава полученных порошков в виде интегральной кривой полных остатков $R(\delta)$ был использован закон распределения Розина-Рамллера, который имеет вид [6]

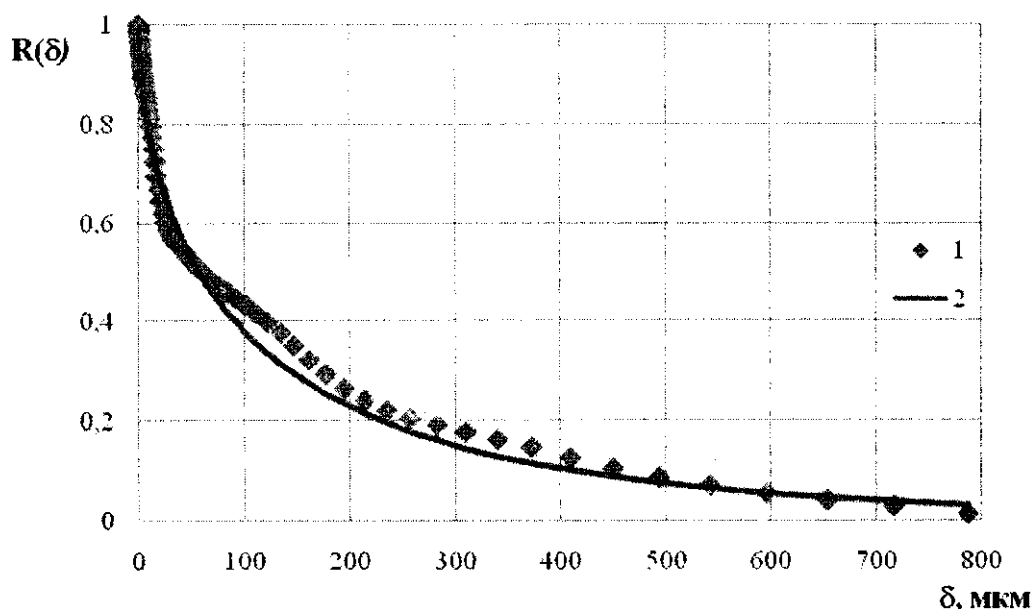
$$R(\delta) = \exp(-B\delta^N), \quad (7)$$

где B и N – эмпирические коэффициенты, которые определяются по выражениям

$$N = \frac{\ln(\ln(1/R_1)/\ln(1/R_2))}{\ln(\delta_1/\delta_2)}, \quad (8)$$

$$B = \frac{1}{\delta_1^N} \ln \frac{1}{R_1}. \quad (9)$$

Для описания всей кривой гранулометрического состава $R(\delta)$ были использованы значения $R_1 = 0,75$ и $R_2 = 0,25$, а также соответствующие им значения δ_1 и δ_2 , которые определялись по интегральной кривой [6]. В результате математической обработки полученных данных были определены значения эмпирических коэффициентов B и N , которые приведены в таблице 1. На рисунке 2 на примере ячменя показана зависимость полного остатка $R(\delta)$ от размера частиц δ .



1 – опытные данные; 2 – расчет по выражениям (7) – (9).

Рисунок 2 – Зависимость полного остатка $R(\delta)$ от размера частиц δ на примере ячменя

Из рисунка 2 видно, что наблюдается хорошее согласование опытных данных и расчетных значений.

Таблица 1 – Коэффициенты B и N в уравнении (7)

Продукт	B	N
Ячмень	0,057	0,6
Рис	0,03	0,77
Пшеница	0,035	0,75
Гречиха	0,03	0,81
Перловка	0,052	0,69

Анализ численных значений коэффициентов B и N показывает, что они коррелируют между собой. В результате обработки получено выражение, аппроксимирующее их взаимосвязь, которое имеет вид

$$B = -0,217 N^2 + 0,156N + 0,042. \quad (10)$$

Величина достоверности аппроксимации составляет 0,906.

Для учета влияния кинематических параметров процесса измельчения был использован критерий Фруда (11) [2], определяемый по медианному диаметру частицы полученной фракции, т.е. по диаметру частицы, при котором масса всех частиц в анализируемом порошке мельче и крупнее данного размера и составляет 50 % [4]. При этом принято допущение, что частица вращается с частотой вращения, равной частоте вращения ротора измельчителя:

$$Fr = \frac{n^2 \delta_m}{g}, \quad (11)$$

где n – частота вращения ротора измельчителя, об/с;

δ_m – медианный диаметр частицы, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Для дальнейшей обработки данных было использовано произведение критериев Архимеда и Фруда (далее комплекс Архимеда-Фруда), которое характеризует соотношение подъемной силы Архимеда, центробежной силы и силы трения, действующие на частицу. В результате было получено выражение (12), описывающее зависимость коэффициента N от произведения критериев Архимеда и Фруда:

$$N = -2 \cdot 10^{-11} (ArFr)^2 + 6 \cdot 10^{-6} (ArFr) + 0,358. \quad (12)$$

Для определения диапазона размеров частиц, на котором необходимо строить интегральную кривую полных остатков, определялся максимальный размер частиц фракции δ_{max} . На основании экспериментальных данных было получено выражение, описывающее зависимость максимального размера частиц фракции от комплекса Архимеда-Фруда, которое имеет вид

$$\delta_{max} = 1 \cdot 10^{-8} (ArFr)^2 - 0,01 (ArFr) + 329,7. \quad (13)$$

Величина достоверности аппроксимации составляет 0,952.

Основной характеристикой процесса измельчения является степень измельчения, величина которой определяется по выражению [2]:

$$i = \frac{\delta_0}{\delta_u}, \quad (14)$$

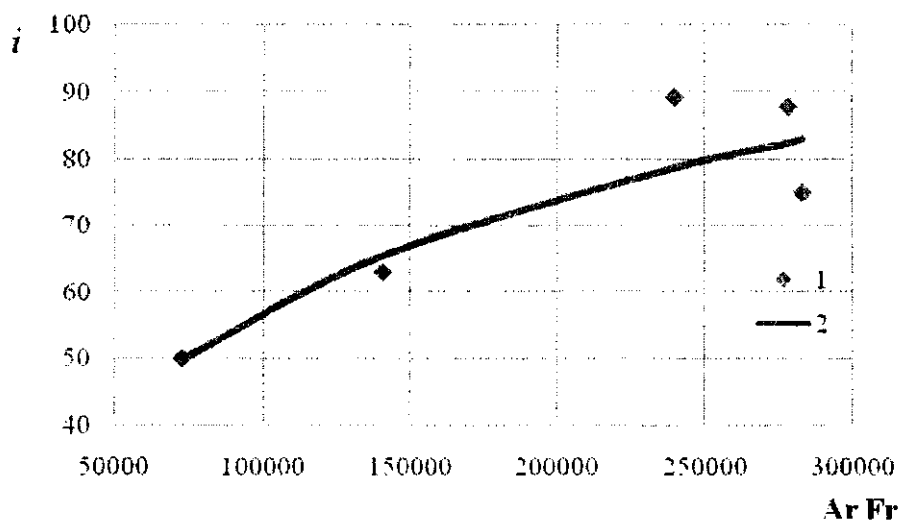
где δ_u – характерный размер частиц измельченного продукта, м.

В качестве характерного размера частиц измельченного продукта был использован медианный диаметр частиц.

В результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость степени измельчения от комплекса Архимеда-Фруда, которое имеет вид

$$i = 171,96(\text{ArFr})^{0,065} - 306,77. \quad (15)$$

На рисунке 3 показана зависимость степени измельчения i от комплекса Архимеда-Фруда ArFr .



1 – опытные данные; 2 – расчет по (15)

Рисунок 3 – Зависимость степени измельчения i от комплекса Архимеда-Фруда ArFr

Из рисунка 3 следует, что степень измельчения возрастает с увеличением значения произведения критериев Архимеда и Фруда. Это можно объяснить тем, что с увеличением критерия Архимеда увеличивается подъемная сила, которая удерживает частицы на определенном уровне и препятствует их оседанию под действием силы тяжести. В свою очередь, с увеличением критерия Фруда увеличивается центробежная сила, что ведет к движению частиц к периферии ротора измельчителя, т.е. в сторону увеличения окружных скоростей.

Заключение

В результате проведенных исследований процесса измельчения злаковых культур получены порошки, гранулометрические составы которых описаны при помощи закона распределения Розина-Раммлера. Полученные результаты представлены в виде критериальных уравнений, описывающих зависимости максимального размера частиц полученных порошков от их физических свойств и кинематических параметров проведения процесса измельчения. Установлено, что степень измельчения возрастает с увеличением значения произведения критериев Архимеда и Фруда.

Литература

- 1 Киркор, М.А. Получение тонкодисперстных пищевых порошков из зерновых культур / М.А. Киркор [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – №1. – С.13–16.
- 2 Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – 8-е изд., перераб. – М.:Химия, 1971. – 784 с.
- 3 Корн, Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн; пер. с англ. под общ. ред. И.Г. Арамановича. – 4-е изд. – М.: Наука, 1977. – 832 с.
- 4 Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.
- 5 Зверев, С.Г. Физические свойства зерна и продуктов его переработки / С.Г. Зверев, Н.С. Зверева. – М.: Дели принт, 2007. – 176 с.
- 6 Мизонов, В. Е. Аэродинамическая классификация порошков / В.Е. Мизонов, С. Г. Ушаков. – М.: Химия, 1989. – 160 с.

Поступила в редакцию 3.11.2011