

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ КАКАОВЕЛЛЫ

М.А. Киркор, В.А. Шуляк, П.А. Ромашихин, А.Г. Смусенок

Приведена конструкция и описан принцип работы новой комбинированной установки для получения порошка из какао-веллы. На основании экспериментальных исследований выполнен анализ процессов измельчения и классификации какао-веллы в новой установке и определены фракционные составы готового порошка в зависимости от частоты вращения ротора классификатора. Получены новые выражения для описания среднеквадратичного отклонения функции распределения частиц порошка относительно медианного диаметра. Определено изменение величины этого отклонения с изменением частоты вращения ротора классификатора. Определены качественные показатели процесса разделения частиц на фракции в виде взаимной зависимости параметра качества классификации от критерия Фруда.

Введение

Кондитерские изделия по своей пищевой ценности характеризуются низким содержанием витаминов, минеральных веществ, пищевых волокон. При производстве многих кондитерских изделий в качестве сырья используются какао-бобы или какао-порошок, придающие вкус шоколада и повышающие потребительский спрос на эти изделия. При переработке какао-бобов образуются отходы – какао-велла, количество которой достигает 10% от объема перерабатываемой продукции. По пищевой ценности какао-велла характеризуется пониженным содержанием жира (какао-масла) и повышенным содержанием витаминов, минеральных веществ и пищевых волокон. Кроме этого какао-велла, даже в большем количестве, чем ядро какао-боба содержит теобромин – вещество, способствующее стимулированию деятельности сердечной мышцы человека, повышающее общий тонус организма. Количество пищевых волокон в какао-велле достигает 60% [1]. Пищевые волокна представлены пектиновыми веществами, клетчаткой и пентозанами. Органолептические свойства какао-веллы сходны с органолептическими свойствами какао-порошка. Ограничения в использовании какао-веллы связаны с трудностью получения из нее порошка с высокой степенью измельчения. Разработка технологии получения из какао-веллы порошка с высокой степенью измельчения позволяет получить продукт, способный заменить в кондитерских изделиях какао-порошок и обогатить кондитерские изделия биологически ценными веществами. Обогащение кондитерских изделий витаминами, минеральными веществами и пищевыми волокнами, при снижении содержания жира, соответствует теориям рационального питания и современным тенденциям создания пищевых продуктов функционального назначения. Использование какао-веллы позволяет повысить пищевую ценность кондитерских изделий. Кроме этого, использование какао-веллы предполагает безотходную технологию переработки какао-бобов [1].

Результаты экспериментов и их обработка

Авторами разработана технология и оборудование для производства порошка какао-веллы с высокой степенью измельчения, полностью соответствующая техническим условиям Республики Беларусь [2]. В настоящее время разработан полный комплект нормативной документации и оборудование для организации производства порошка какао-веллы. Разработаны и опробованы на пищевых предприятиях РБ рецептуры мороженого и мучных кондитерских изделий с порошком какао-веллы: пряников, мучных сладостей, печенья, коврижки и т.п.

С целью изучения процесса измельчения какао-веллы была спроектирована и изготовлена установка для тонкого измельчения и классификации, общий вид которой представлен на рисунке 1. Установка включает в себя измельчитель ударно-стирающего действия и центробежный классификатор, объединенные в одном рабочем объеме, шнековый питатель и циклон.

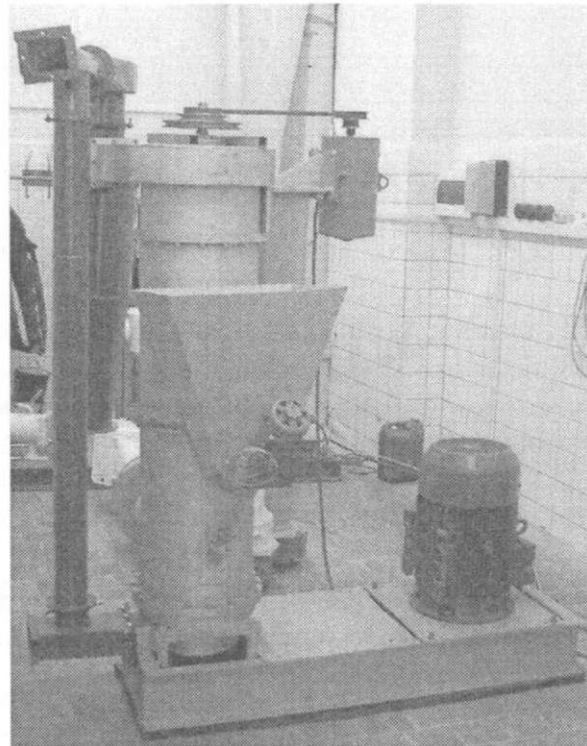


Рисунок 1 – Установка для тонкого измельчения и классификации

Установка работает следующим образом: в бункер питателя засыпается исходный продукт – какаоветлу. Затем одновременно приводятся во вращение рабочие органы измельчителя и классификатора. При достижении ими рабочих параметров процесса включается шнек питателя. Исходный продукт поступает в помольную камеру мельницы, где за счет ударно-истирающего воздействия измельчается. В то же время ротор измельчителя работает как вентилятор, за счет чего измельченный продукт захватывается потоком воздуха и поступает на разделение в классификатор. Под действием центробежных сил полидисперсный материал разделяется на две фракции: крупную и мелкую. Мелкая фракция, соответствующая своими размерами технологическим требованиям, выводится из классификатора в циклон и собирается в сборнике готового продукта. Крупная же фракция возвращается на доизмельчение, не покидая объема рабочей камеры установки.

Оценку качества измельчения готового продукта – порошка какаоветлы – проводили по кривым распределения частиц по размерам. Для описания гранулометрического состава полидисперсных материалов принято использовать дифференциальные или интегральные кривые распределения частиц. Нами были исследованы грансоставы мелкой фракции в зависимости от частоты вращения ротора классификатора (от 400 до 1000 об/мин) при постоянной частоте вращения рабочего органа измельчителя (8500 об/мин).

В современной литературе [3, 4] для описания кривых используются различные законы распределения, однако в результате собственных аналитических исследований было установлено, что наиболее точно на всем интервале размеров частиц интегральные кривые описывает закон Розина – Раммлера [3].

$$R(\delta) = \exp(-B \cdot \delta^N), \quad (1)$$

где B и N – эмпирические константы.

В результате математической обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов были определены значения эмпирических констант B и N , а также проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных по распределению частиц по размерам (рис. 2).

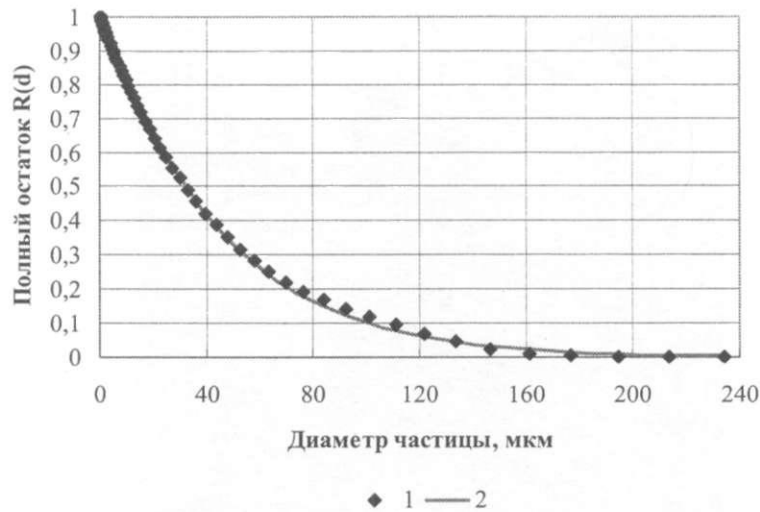


Рисунок 2 – Интегральная кривая распределения частиц по размерам порошка какао-веллы при частоте вращения ротора классификатора $n = 800$ об/мин:
1 – эксперимент; 2 – расчет.

Явный вид закона Розина-Рамлера для кривой, представленной на рисунке 2:

$$R(\delta) = \exp(-0,0177\delta^{1,056}). \tag{2}$$

Среднеквадратичное отклонение расчетных и экспериментальных данных составило 0,64%.

В таблице 1 приведены значения эмпирических констант B и N для разных частот вращения ротора, а также значения среднеквадратичных отклонений расчетных и экспериментальных данных.

Таблица 1 - Значения эмпирических констант B и N и среднеквадратичных отклонений при разных частотах вращения ротора классификатора

Частота вращения ротора классификатора n , об/мин	Значение коэффициента B	Значение коэффициента N	Среднеквадратичное отклонение σ , %
400	0,0227	0,938	3
500	0,013	1,07	1,2
600	0,017	1,017	0,77
700	0,022	0,976	1,18
850	0,0254	1,012	0,91
900	0,0218	1,0058	0,258

С целью математической обработки экспериментальных данных в критериальном виде нами были определены значения критерия Фруда:

$$Fr = \frac{n^2 \cdot D}{g}, \tag{3}$$

где n – частота вращения ротора классификатора, об/с; D – диаметр ротора, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

С учетом полученных значений зависимость среднеквадратичного отклонения расчетных и экспериментальных значений примет вид

$$\sigma = \frac{A}{Fr}, \quad (4)$$

где A – эмпирическая константа ($A=0,04$).

Одними из важнейших параметров кривых распределения частиц по размерам являются:

- медианный диаметр δ_m – размер частицы, для которой остаток на сите составляет 50%, мкм;
- δ_{10} – размер частицы, для которой остаток на сите составляет 10%, мкм;
- δ_{90} – размер частицы, для которой остаток на сите составляет 90%, мкм;
- среднеарифметический размер фракции δ_s – диаметр частиц условного монодисперсного порошка, имеющего одинаковое число частиц с анализируемым порошком, причем сумма диаметров в обоих порошках одинакова, мкм [5].

Экспериментальные данные по этим параметрам сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Значения определяющих размеров фракций в зависимости от частоты вращения ротора

Частота вращения ротора классификатора n , об/мин	Медианный диаметр δ_m , мкм	δ_{10} , мкм	δ_{90} , мкм	Среднеарифметический размер фракций δ_s , мкм
400	44	7	139	59
500	43	7	141	59
600	41	7	134	56
700	38	6	127	53
800	35	5	119	49
850	30	5	110	44
900	34	5	117	48

Для функции на рис. 2 он составляет 32 мкм. Другим важным параметром функции распределения является разброс размеров частиц относительно среднего, т.е. среднеквадратичное отклонение от медианного размера. Данный параметр определялся по выражению

$$\sigma_m = \frac{1}{i} \sqrt{\sum_1^i (\delta - \delta_m)^2}, \quad (5)$$

где δ – текущий размер частицы, мкм;
 i – число измерений.

В результате математической обработки интегральных кривых были получены значения среднеквадратичного отклонения при разных частотах вращения ротора классификатора, которые в графическом виде представлены на рисунке 3. Из данного рисунка следует, что с увеличением частоты вращения ротора классификатора среднеквадратичное отклонение вначале растет, достигая своего максимального значения при 500 об/мин, затем падает и при частотах более 700 об/мин практически не изменяется, колеблется в пределах значения 6,8 мкм.

С целью математического описания зависимости среднеквадратичного отклонения при малых частотах вращения рабочего органа классификатора в удобном для инженерных расчетов виде нами были определены значения критерия Фруда для частот вращения менее 700 об/мин.

В результате обработки экспериментальных данных было получено критериальное уравнение, описывающее зависимость среднеквадратичного отклонения функции распределения от медианного размера в диапазоне рабочих частот вращения ротора

классификатора:

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_M}{\sigma_{\max}} = 0,06789(Fr - Fr_{\max})^{0,86}, \quad (6)$$

где σ_{\max} – максимальное значение среднеквадратичного отклонения от медианного размера ($\sigma_{ma} = 7,85 \text{ мкм}$); Fr_{\max} – значение критерия Фруда, соответствующее максимальному значению среднеквадратичного отклонения от медианного размера ($Fr_{\max} = 2,4$).

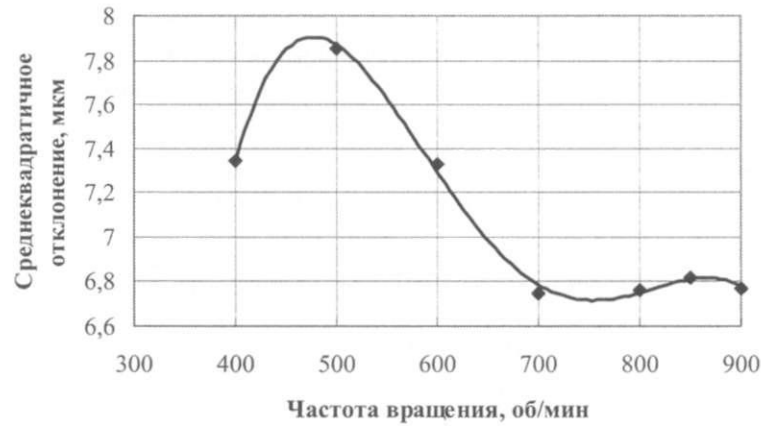


Рисунок 3 – Зависимость среднеквадратичного отклонения от медианного диаметра от частоты вращения ротора классификатора

Для описания эффективности классификации используют две группы оценки качества процесса. Первая группа связана с числовой интерпретацией кривых разделения и в конечном счете дает оценку совершенства того или иного аппарата без связи с параметрами разделяемого материала и технологическим процессом, в котором он установлен. Основу этих критериев составляет оценка степени отклонения реальной кривой разделения от идеальной. Обычно кривую разделения преобразуют к безразмерному аргументу $\delta' = \frac{\delta}{\delta_{gp}}$, в результате чего появляется общая для всех кривых точка $\varphi_{\delta}(1) = 0,5$.

Одними из критериев этой группы являются КПД классификатора η и степень проскока ε , определяемые по выражениям [3]

$$\eta = \int_0^1 \varphi(\delta') d\delta' \quad (7)$$

$$\varepsilon = \int_1^{\delta_m} \varphi(\delta') d\delta' \quad (8)$$

Для идеального процесса $\eta \rightarrow 1$, $\varepsilon \rightarrow 0$. Переход к двум критериям эффективности ухудшает удобство сравнения классификаторов. Поэтому на основе критериев η и ε был сформирован единый критерий, названный качеством классификатора K_k .

$$K_k = \frac{\eta}{\varepsilon} \quad (9)$$

При обработке экспериментальных данных были получены значения качественных показателей процесса классификации, которые представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Качественные показатели процесса классификации

Частота вращения ротора классификатора n , об/мин	КПД классификатора η , %	Степень проскока ε	Качество классификации K_k
400	70,82	47,6	1,49
500	70,87	44,6	1,59
600	70,79	51,3	1,38
700	70,41	49,5	1,42
800	70,27	65	1,08
850	70,6	95	0,74
900	70,39	42,6	1,65

После математической обработки экспериментальных данных по качественным характеристикам процесса классификации было получено критериальное уравнение, описывающее зависимость качества классификации от конструктивных и режимных параметров проведения процесса:

$$K_k = 0,0293Fr^3 - 0,384Fr^2 + 1,3973Fr + 0,0868. \quad (10)$$

На основании экспериментальных исследований было установлено, что с увеличением частоты вращения ротора классификатора при постоянной частоте вращения рабочего органа измельчителя значения максимального и медианного размера частиц уменьшаются. Среднеквадратичное отклонение размеров функции распределения частиц готового продукта, лежит в пределах от 6,7 до 7,85. Максимальному же значению качества классификации соответствует частота вращения ротора 900 об/мин, а минимальному – 850 об/мин, что соответствует максимальному значению степени проскока.

Заключение

Разработана установка, которая позволяет получать порошки из какао-порошка высокого качества со средним размером частиц на уровне 25-30 мкм, отвечающие требованиям технологического процесса производства кондитерских изделий. Проведенные исследования позволили получить критериальные зависимости для описания среднеквадратичного отклонения функции распределения частиц порошка относительно медианного диаметра в зависимости от кинематических параметров работы встроенного классификатора. Опытный образец установки для тонкого измельчения УТИ-100 внедрен на ОАО «Коммунарка» (Минск).

Литература

1. Ромашихин, П.А. Способ определения фальсификации какао-порошка / П.А. Ромашихин, М.В. Скоклеенко // Кондитерское производство. – 2005. – №2. – С. 34 – 35.
2. Порошок из какао-порошка: ТУ РБ 29093074.001 – 99. – Введ. 20.05.99. – Могилев: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: ПП «Техносервис», 1999. – 8с.
3. Мизонов, В. Е. Аэродинамическая классификация порошков / В.Е. Мизонов, С. Г. Ушаков. – М.: Химия, 1989. – 160с.
4. Белоглазов, И.Н. К характеристике распределения частиц по крупности в сложной дисперсной системе / И.Н. Белоглазов, М.И. Курочкина // Журнал прикладной химии. – 1991. – № 10. – С. 2079 – 2082.
5. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – Л.: Химия, 1987. – 264с.

Поступила в редакцию 17.07.2006