УДК 663.915

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНОАКТИВАТОРАХ

Беззубцева М.М., Волков В.С.

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург, e-mail: mysnegana@mail.ru

В статье представлены результаты исследований кинетических закономерностей процесса измельчения материалов электромагнитным способом. Исследования проведены на примере измельчения сахарного песка в сахарную пудру для нужд шоколадного производства на инновационном электромагнитном механоактиваторе (ЭММА), представляющем предмет изобретения. Доказана целесообразность использования электромагнитного способа формирования измельчающего усилия для диспергирования твердой фазы шоколадных полуфабрикатов. Получено уравнение для описания кинетики процесса диспергирования сахарного песка электромагнитным способом. Эмпирическое кинетическое уравнение позволяет сократить многочисленные трудоемкие операции дисперсионного анализа для каждого конкретного сочетания электромагнитного и скоростного режимов работы ЭММА.

Ключевые слова: кинетические закономерности, электромагнитная механоактивация, энергоэффективность

FOR INVESTIGATING THE KINETIC REGULARITIES OF THE PROCESS OF GRINDING IN ELECTROMAGNETIC MECHANOACTIVATION

Bezzubceva M.M., Volkov V.S.

St.-Peterburg agrarian university, St.-Peterburg, e-mail: mysnegana@mail.ru

The article presents the results of kinetic regularities of the process of crushing materials by electromagnetic method. The studies are conducted in the grinding of granulated sugar to caster sugar for the needs of chocolate production on innovative electromagnetic mechanoactivation (EMMA), representing the subject invention. Proved the feasibility of using electromagnetic method of forming a grinding effort to disperse solids chocolate products. The equation for describing the kinetics of the dispersion process sugar electromagnetic method. Empirical kinetic equation reduces numerous time-consuming operations variance analysis for each specific combination of electromagnetic and high-speed modes of EMMA.

Keywords: кinetic regularities, mechanoactivation electromagnetic, energy efficiency

Кинетические закономерности измельчения продуктов электромагнитным способом позволяют определить производительность и энергоэффективность электромагнитных механоактиваторов (ЭММА) на стадии проектирования [1, 2, 3, 4]. Проведенные экспериментальные исследования процесса механоактивации продуктов электромагнитным способом показывают [5, 6, 7, 8], что наибольшее влияние на кинетику измельчения, оказывают не только физико-механические свойства перерабатываемого материала, но и конструктивные особенности электромагнитных механоактиваторов, а также режимы их работы. При рациональном соотношении скоростных и электромагнитных режимов работы ЭММА возможно селективное измельчение, что способствует получению продукта в заданном технологией диапазоне дисперсности [9, 10].

Целью исследования является выявление кинетических закономерностей процесса измельчения продуктов электромагнитным способом с получением эмпирического кинетического уравнения переработки материалов в ЭММА.

Материалы и методы исследований

Кинетические закономерности процесса измельчения продуктов электромагнитным способом на примере переработки сахарного песка в сахарную пудру на инновационном электромагнитном механоактиваторе. Использованы аналитические и экспериментально-статистические методы исследований.

Результаты исследования и их обсуждение

Процесс измельчения материала в электромагнитных механоактиваторах рассмотрен по аналогии с описанием химической реакции в реакторе как кинетический процесс [9]. Уравнение кинетики для химической реакции *n*-го порядка может быть использовано для описания гранулометрического состава, образующегося при измельчении продукта фракций в зависимости от времени протекания процесса: $\frac{R_K}{R_H} = e^{-k_c t^{m_c}}$ (здесь R_H и R_K – содержание крупного класса соответственно в исходном и готовом продуктах, выраженное в процентах, или «остаток» материала по контролирующим технологией фракциям; k_c – константа скорости измельчения, сек$^{-1}$;

t – время пребывания материала в механоактиваторе или продолжительность процесса диспергирования продукта, сек; m_c – константа, характеризующая изменение скорости измельчения при увеличении дисперсности продукта в процессе обработки). При описании измельчения как кинетического процесса уменьшения размера частиц применяют два параметра – скорость разрушения частиц заданного размера и гранулометрический состав образующегося при этом продукта частиц ниже верхнего (контролирующего) размера фракций. При этом скорость измельчения принято выражать через математическое ожидание $\overline{\delta}$ функции распределения $\frac{d\delta}{dt} = -a\overline{\delta}^b$, (здесь a и b – коэффициенты, связанные со свойствами измельчаемого материала и характеристиками измельчителя; t – продолжительность измельчения продукта). Уравнение линеаризуется последовательным логарифмированием. Это позволяет оценивать константы k_c и m_c по экспериментальным данным как графически в координатах lglg – lg, так и аналитически. Подставив в общее уравнение кинетики полученные опытным путем значения остатков контролирующих фракций R_1 и R_2 в момент времени t_1 и t_2 и приняв $R_H = 1$, получим:

$$\left.\begin{aligned} R_1 &= e^{-k_c t_1^{m_c}} \\ R_2 &= e^{-k_c t_2^{m_c}} \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

В результате двойного логарифмирования системы уравнений (1) можно вычислить константы k_c и m_c:

$$m_c = \frac{\ln\left(\frac{\ln R_1}{\ln R_2}\right)}{\ln\frac{t_1}{t_2}}, \qquad (2)$$

$$k_c = -\ln R\Big|_{t_1^{m_c}} = -\ln R_2\Big|_{t_2^{m_c}}$$

и получить эмпирические уравнения кинетики процесса измельчения продуктов на электромагнитных механоактиваторах различного конструктивного исполнения.

Исследования кинетики процесса диспергирования полуфабрикатов шоколадного производства проведены на электромагнитном механоактиваторе, представляющем предмет изобретения (патент РФ № 2038024) [11]. Продолжительность процесса диспергирования сахарного песка (рецептурного компонента шоколадных масс) электромагнитным способом определена из анализа кинетической кривой, представленной на рис. 1 в виде «остатка» неизмельченного материала по содержанию контролирующей фракции размером более 30 мкм, а также функций распределения частиц сахарной пудры по размерам, (рис. 2). Продолжительность обработки определялась путем анализа гранулометрического состава продукта помола, определенного дисперсионным анализом.

Из приведенных данных следует, что процесс диспергирования заканчивается на требуемом уровне (при содержании контролирующих фракций $R_{\delta 30}$ = 7 %) за 120 секунд обработки. При этом установлено, что с увеличением времени обработки кумулятивные кривые смещаются в область более измельченного материала и максимум кривых соответствует меньшим размерам частиц.

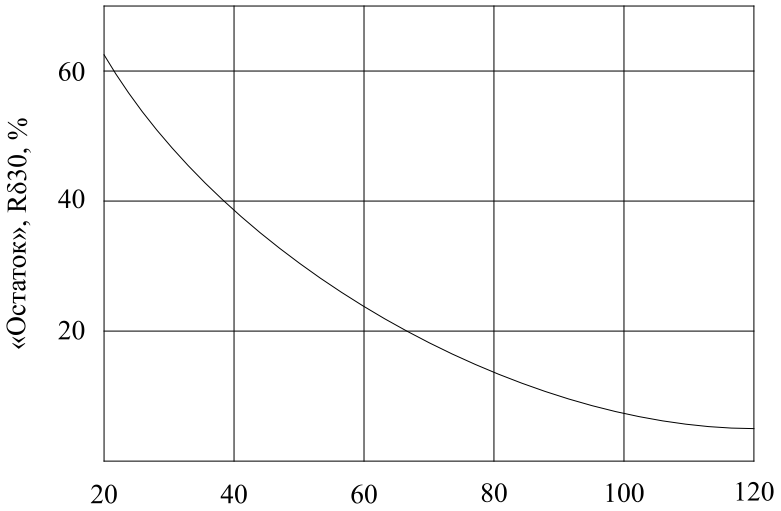

Рис. 1. Кинетика измельчения сахарной пудры электромагниным способом

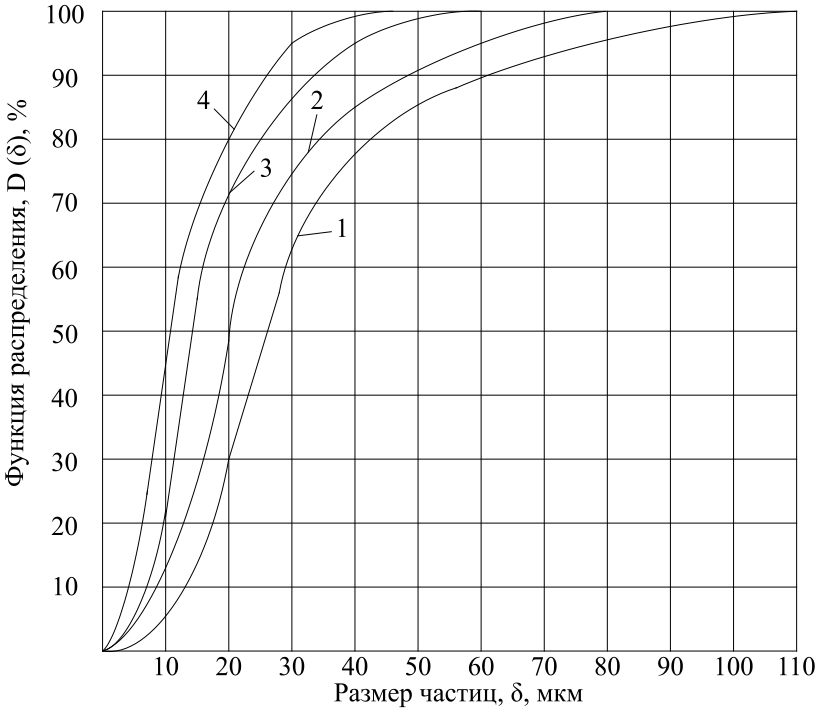

Рис. 2. Функции распределения частиц сахарной пудры, полученной наЭММА за время обработки t, с: 1 – 40 с; 2 – 60 с; 3 – 100 с; 4 – 120 с

Массовая доля частиц сахарной пудры, имеющая оптимальный для полуфабрикатов шоколадного производства диапазон дисперсности (10 мкм – 30 мкм) увеличивается от 55 % за 40 секунд обработки, до 61 % за 100 секунд и достигает при этом максимального значения. Увеличение продолжительности процесса диспергирования до 120 секунд приводит к росту нежелательных фракций размером менее 10 мкм до 45 %, что ухудшает условия дальнейших технологических операций приготовления шоколадных изделий и приводит к значительному повышению их энергоемкости и себестоимости [12]. Таким образом, на основании экспериментальных данных установлено, что продолжительность процесса диспергирования сахарного песка до сахарной пудры в режиме работы $I_y = 0{,}8$ А и $n = 23{,}3$ с$^{-1}$ составляет 100 секунд. При этом полуфабрикат имеет наиболее рациональные гранулометрические характеристики: $D_{\delta 30} = 93$ %, $D_{\delta 30} - D_{\delta 10} = 61$ %, $\delta_{MAX} = 63$ мкм.

Необходимо отметить, что в продуктах помола, полученных на ЭММА, массовая доля частиц, находящаяся в оптимальном диапазоне дисперсностей, примерно в 1,5 раза больше, чем в сахарной пудре, обработанной на традиционных видах измельчающего оборудования (микромельницы, дезинтеграторы и т.д.) [9, 11].

Это свидетельствует о целесообразности использования электромагнитного способа формирования измельчающего усилия для диспергирования твердой фазы шоколадных полуфабрикатов.

Экспериментальными исследованиями процесса диспергирования сахарного песка до сахарной пудры на ЭММА получено следующее кинетическое уравнение: $\frac{R_k}{R_H} = e^{-5{,}2t^{0{,}31}}$.

Заключение

Эмпирическая зависимость позволяет вычислить количество неизмельченного на ЭММА сахарного песка размером более 30 мкм (в режиме работы устройства $I_y = 0{,}8$ А; $K_Ф = 0{,}25$; n = 23,3 с$^{-1}$) для любого времени измельчения. Применение общего кинетического уравнения для описания кинетики процесса диспергирования сахарного песка в ЭММА дает возможность сократить многочисленные трудоемкие операции дисперсионного анализа для каждого конкретного сочетания электромагнитного и скоростного режимов работы устройства [13, 14].

Список литературы

1. Волков В.С., Беззубцева М.М., Обухов К.Н., Котов А.В. Энергетическая теория способа формирования диспергирующих нагрузок в электромагнитных механоак-

тиваторах // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–6. – С. 1157–1161.

2. Беззубцева М.М., Волков В.С. Рекомендации по проектированию электромагнитных механоактиваторов // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 5–2. – С. 128–129.

3. Беззубцева М.М., Обухов К.Н. Энергетические параметры, характеризующие работу электромагнитных механоактиваторов //Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 8–1. – С. 134–135.

4. Беззубцева М.М., Волков В.С. Классификация электромагнитных механоактиваторов по технологическому назначению//Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 8–1. – С. 25–27.

5. Беззубцева М.М. Исследование процесса измельчения какао-бобов в электромагнитных механоактиваторах // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 3. – С. 171.

6. Беззубцева М.М. Интенсификация классических технологических схем переработки сырья на стадии измельчения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. –2014. – № 2–2. – С. 132–133.

7. Беззубцева М.М. Исследование процесса диспергирования продуктов шоколадного производства с использованием электромагнитного способа механоактивации // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 5–2. – С. 78–79.

8. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н. Электромагнитная механоактивация полуфабрикатов шоколадного производства // Международный журнал экспериментального образования. –2015. – № 3–1. – С. 73–74.

9. Беззубцева М.М., Волков В.С. Теоретические исследования электромагнитного способа измельчения материалов (монография) // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 2–1. – С. 68–69.

10. Беззубцева М.М., Волков В.С., Котов А.В., Обухов К.Н. К вопросу исследования электромагнитного способа механоактивации рецептурных компонентов шоколадных изделий // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 4. – С. 12–14.

11. Беззубцева М.М., Волков В.С. Механоактиваторы агропромышленного комплекса. Анализ, инновации, изобретения (монография) // Успехи современного естествознания. –2014. –№ 5–1. – С. 182.

12. Беззубцева М.М., Обухов К.Н. Электромагнитный способ снижения энергоемкости продукции на стадии измельчения // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 8–3. – С. 399–400.

13. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование режимов работы элекромагнитных механоактиваторов // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 8. – С. 109–110.

14. Беззубцева М.М., Волков В.С., Зубков В.В. Исследование аппаратов с магнитоожиженным слоем // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6–2. – С. 258–262.