

УДК 663.915

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСКОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕХАНОАКТИВАТОРА ПУТЕМ АНАЛИЗА КИНЕТИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

Беззубцева М.М., Волков В.С.

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

Представлены результаты исследований кинетических и энергетических закономерностей процесса диспергирования и механоактивации вторичного сырья кондитерского производства – какао-шеллы в дисковом электромагнитном механоактиваторе (ЭДМА). *Какао-шелла* составляет 15% от массы дорогостоящего импортного сырья семян какао-бобов и является побочным продуктом (отходом) перерабатывающей промышленности. Содержание витаминов в какао-шелле в два раза выше, чем в ядре какао-бобов. Использование такого ценного по химическому составу вторичного сырья в производстве комбикормов ограничено отсутствием энергоэффективного измельчающего оборудования. Установлено, что величина частиц диспергированного в ЭДМА полуфабриката какао-шеллы находится в узком и оптимальном диапазоне дисперсности, регламентированном технологией производства комбикорма. Полученные результаты представляют собой математические зависимости кинетики процесса измельчения. Уравнения кинетики описывают содержание контролируемых фракций измельченной в ЭДМА витаминизированной кормовой добавки – какао-шеллы в любой момент времени обработки. Установлено, что относительное возрастание затрат энергии при диспергировании до стандартизированной степени измельчения определяется только отношением затрат времени. Полученные закономерности позволяют моделировать процесс промышленного измельчения в лабораторных измельчителях – механоактиваторах дискового исполнения и проводить оценку энергоэффективности промышленного оборудования.

Ключевые слова: электромагнитный механоактиватор, производство комбикорма, какао-шелла, кинетические закономерности

RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY OF THE DISK ELECTROMAGNETIC MECHANOACTIVATOR BY THE ANALYSIS OF KINETIC AND POWER REGULARITIES

Bezzubceva M.M., Volkov V.S.

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

Results of researches of kinetic and power regularities of process of disintegrating and mechanoactivation of secondary raw materials of confectionery production – cocoa shell in the disk electromagnetic mechanoactivator (EDMA) are presented. Cacao shell makes 15% from the weight of expensive import raw materials of seeds of cocoa beans and is a by-product (withdrawal) of processing industry. The content of vitamins in cacao shell is twice higher, than in a cocoa kernel – beans. Use of such secondary raw materials valuable on chemical structure in production of compound feeds is limited to lack of the power effective crushing equipment. It is established that the size of particles of the semi-finished product dispersed in EDMA cacao shell is in the narrow and optimum range of dispersion regulated by the production technology of compound feed. The received results represent mathematical dependences of kinetics of process of crushing. The equations of kinetics describe the maintenance of controlled fractions of the vitaminized feed additive crushed in EDMA – cacao shell at any moment of processing's. It is established that relative increase of expenses of energy when disintegrating to standardized extent of crushing is defined only by the relation of expenses of time. The received regularities allow to model process of industrial crushing in laboratory grinders – mechanoactivators of disk execution and to carry out an assessment of energy efficiency of the industrial equipment.

Keywords: electromagnetic mechanoactivator, production of compound feed, cocoa shell, kinetic regularities

Актуальной проблемой предприятий АПК является повышение энергоэффективности производства путем внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий. Значительное ресурсосбережение в кормопроизводстве достигается за счет использования вторичного сырья. *Какао-шелла* составляет 15% от массы дорогостоящего импортного сырья семян какао-бобов и является побочным продуктом (отходом) перерабатывающей промышленности. Между тем в какао-шелле содержится белок, крахмал, дубильные вещества, алкалоид, аминокислоты (лейцин, изолейцин, аланин, валин, тирозин, фениланин), клетчатка,

крахмал, пектин и пентазан. На долю углеводов приходится 41–46%, массовая доля белка, клетчатки и пентозанов превышает их массовую долю в ядре. Содержание витаминов в какао-шелле в два раза выше, чем в ядре какао-бобов. Использование такого ценного по химическому составу вторичного сырья в производстве комбикормов ограничено отсутствием энергоэффективного измельчающего оборудования. Традиционное измельчающее оборудование в аппаратурно-технологических системах кормопроизводства не обеспечивает выход продукта с оптимальными качественными и энергетическими показателями. Решение

этой проблемы возможно путем внедрения электромагнитного способа механоактивации [3, 4, 6, 12] в технологические схемы переработки сырьевых материалов. В результате теоретических и экспериментальных исследований [1, 5, 7–11] выявлено, что электромагнитные дисковые механоактиваторы ЭДМА-С и ЭДМА-К [2, 14] в технологических линиях производства витаминизированной добавки – какаоветлы обеспечивают получение готового продукта в узком и оптимальном диапазоне дисперсности при минимальных энергозатратах.

Цель работы – исследование энергоэффективности электромагнитных механоактиваторов дискового исполнения на основании анализа кинетических и энергетических закономерностей процесса диспергирования вторичного сырья шоколадного производства – какаоветлы.

Материал и методы исследований

Предметом исследований являются кинетические и энергетические закономерности процесса механоактивации в аппаратах типового ряда ЭДМА.

Результаты исследования и их обсуждение

Технологические требования, предъявляемые к гранулометрическому составу дисперсной фазы комбикорма с использованием витаминизированной добавки – какаоветлы

[15], обуславливают использование двух критериев для оценки качества их измельчения – степень измельчения $D_{\delta 1,8}$ и «проход» фракций размером менее 1,0 мм $D_{\delta 1,0}$.

С целью выявления кинетических и энергетических закономерностей процесса механоактивации какаоветлы были проведены серии опытов на аппаратах типового ряда ЭДМА (патенты РФ № 2045195 и № 84263) при различных режимах работы. Математической обработкой экспериментальных данных получено эмпирическое уравнение, позволяющее определить степень измельчения исследуемого продукта в любой момент времени обработки

$$D_{\delta 1,8;1,0} = \frac{D_{\delta H} + 10^2(e^{G_g G_s t} - 1)}{e^{G_g G_s t} - 1 + G_g}; \quad (1)$$

где $D_{\delta H}$ – степень измельчения материала по контролируемым фракциям в начальный момент времени; t – время измельчения; G_g – коэффициент, характеризующий прочность продукта, его измельчаемость и условия измельчения; G_s – коэффициент, характеризующий скорость измельчения в начальный момент времени и определяющий наклон кинетической кривой к оси абсцисс в начале процесса.

Значения коэффициентов G_g и G_s приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов уравнения кинетики измельчения какаоветлы в ЭДМА

Исследуемый продукт	Значение коэффициентов по критерию $D_{1,8}$	Значение коэффициентов по критерию $D_{1,0}$
Какаоветла	$G_g = 4,75$	$G_g = 1,692$
	$G_s = 0,151$	$G_s = 0,092$
	$G_g G_s = 0,717$	$G_g G_s = 0,155$

Сравнительный анализ расчетных значений (Р) и опытных данных (О) представлен в табл. 2.

Математический анализ уравнения (1) показывает, что оно имеет физическое обоснование, так как удовлетворяет граничным условиям процесса измельчения и легко сводится к известному аналитическому уравнению Разумова [13]:

$$R_{\delta} = \frac{R_{\delta H} P}{e^{kpt} + p - 1}, \quad (2)$$

где R_{δ} – (*Rückstand* – остаток, нем.) измельченного материала (контролируемого

крупного класса) в любой момент времени измельчения t ; $R_{\delta H}$ – содержание крупного класса в начальный момент времени ($t = 0$); P и K – параметры уравнения кинетики ($P = G_g$ и $K = G_s$).

В уравнениях (1) и (2) скорость измельчения $\frac{dD_{\delta}}{dt}$ или $\frac{dR_{\delta}}{dt}$ в начальный момент времени (когда $t \rightarrow 0$) и в конце процесса (при $t \rightarrow \infty$) имеет определенную конечную величину (не 0 и не ∞).

Таким образом, коэффициенты уравнения кинетики процесса измельчения какаоветлы в ЭДМА могут быть определены

аналитическим путем по двум точкам кинетической кривой, т.е. по двум значениям «остатков» $R_{1,8}$ и R_1 при времени обработки $t_2 = 2t$:

$$\left. \begin{aligned} R_{\delta 1,8(1)} &= \frac{R_{\delta H} G_g}{e^{G_g G_s t} + 1 - G_g}; & R_{\delta 1,0(1)} &= \frac{R_{\delta H} G_g}{e^{G_g G_s t} + 1 - G_g}; \\ R_{\delta 1,8(2)} &= \frac{R_{\delta H} G_g}{e^{G_g G_s t} + 1 - G_g}; & R_{\delta 1,0(2)} &= \frac{R_{\delta H} G_g}{e^{G_g G_s t} + 1 - G_g}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Таблица 2

Расчетные и опытные данные по измельчению какаоветлы в ЭДМА

Исследуемый продукт	«Durchgang» по контролируемой фракции менее 1,8 мм	Время измельчения, с						
		10	20	30	40	50	60	
Какаоветла	$D_{\delta} 1,8(O)$	19,0	39,9	63,2	78,9	90,5	97,0	
	$D_{\delta} 1,8(P)$	18,5	41,1	62,9	79,7	90,4	96,5	
	$D_{\delta} 1,8(O) - D_{\delta} 1,8(P)$	0,5	-1,2	0,3	-0,8	0,1	0,5	
Какаоветла	«Durchgang» по контролируемой фракции менее 1,0 мм	Время измельчения, сек						
		10	20	30	40	50	60	
		$D_{\delta} 1,0(O)$	9,2	18,0	26,9	34,5	42,0	48,2
		$D_{\delta} 1,0(P)$	9,0	17,8	26,1	33,9	41,2	47,9
	$D_{\delta} 1,0(O) - D_{\delta} 1,0(P)$	0,2	0,2	0,8	0,6	0,8	0,3	

Решение этой системы дает следующее значение коэффициентов уравнения кинетики:

$$G_g = \frac{1 + R_{\delta H} \left(\frac{1}{R_{1,8;1,0(2)}} - \frac{1}{R_{1,8;1,0(1)}} \right)}{\left(\frac{R_{\delta H}}{R_{1,8;1,0(1)}} - 1 \right)^2}; \quad (4)$$

$$G_s = \frac{\ln \left(\frac{R_{\delta H} G_g}{R_{\delta 1,8;1,0}} - G_g + 1 \right)}{G_g t}. \quad (5)$$

По формулам (4) и (5) определены коэффициенты G_g и G_s и составлены уравнения кинетики, описывающие содержание контролируемых фракций измельченной в ЭДМА какаоветлы в любой момент времени обработки (табл. 3).

Таблица 3

Уравнения кинетики процесса измельчения в ЭДМА

Исследуемый продукт	Уравнение кинетики по «остатку» фракций размером более 1,8 мм	Уравнение кинетики по «остатку» фракций размером более 1,0 мм
Какаоветла	$R_{\delta(1,8)} = \frac{4,75 \cdot R_{\delta H(1,8)}}{e^{4,75 \cdot G_s \cdot t} + 3,75}$	$R_{\delta(1,0)} = \frac{1,692 \cdot R_{\delta H(1,0)}}{e^{1,692 \cdot G_s \cdot t} + 0,692}$

Продолжительность обработки какаоветлы в ЭДМА до содержания готового класса (1,8 мм) от 30 до 90% определялась по формуле [13]:

$$t = \frac{\ln \left(\frac{R_{\delta H(1,8)} G_g}{R_{\delta 1,8} - G_g + 1} \right)}{G_s G_g}, \quad (6)$$

где $R_{\delta H(1,8)} = 100 - D_{\delta H(1,8)}$; $R_{\delta(1,8)} = 100 - D_{\delta(1,8)}$; $D_{\delta H(1,8)}$, $D_{\delta(1,8)}$ – степень измельчения продукта в начальный и конечный моменты времени обработки в ЭДМА.

Относительное возрастание затрат энергии при измельчении какаоветлы от степени измельчения $D_{\delta 1,8} = x$ ($0 < x < 90\%$) до стандартизированной степени измельчения

$D_{\delta 1,8} = 90\%$ определяется только отношением времени измельчения до 90% ко времени измельчения до $D_{\delta 1,8} = x$, так как мощность рабочего процесса в ЭДМА при делении сократится.

Из анализа табл. 4 и 5 следует, что относительное возрастание затрат энергии при снижении крупности какаоветлы в типовых рядах аппаратов ЭДМА имеют одинаковые

значения, что позволяет моделировать промышленное измельчение в лабораторных условиях.

Зависимость относительных затрат энергии при измельчении какаоветлы электромагнитным способом от содержания в продукте готового класса (1,8 мм) до стандартизированного значения представлена на рисунке.

Таблица 4

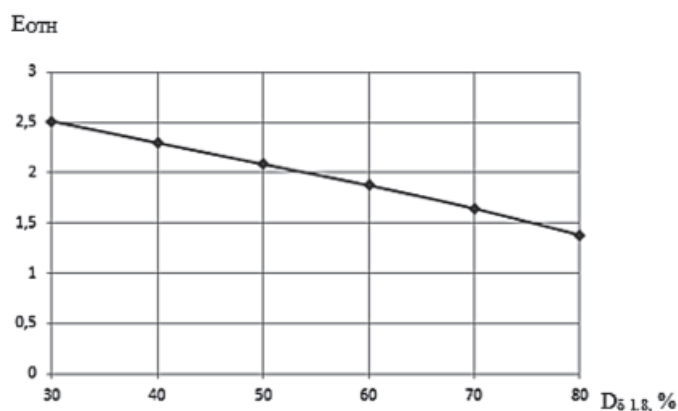
Продолжительность обработки какаоветлы от 30 до 90%

Тип аппарата	Время измельчения, с до содержания класса 1,8 мм						
	30	40	50	60	70	80	90
ЭДМА-С	20,42	20,64	20,89	30,21	30,65	40,35	60,06
ЭДМА-К	20,47	20,71	20,9	30,35	30,83	40,57	60,25

Таблица 5

Относительные затраты энергии при измельчении компонентов корма в ЭДМА

Тип аппарата	Относительные затраты энергии					
	t_{90}/t_{30}	t_{90}/t_{40}	t_{90}/t_{50}	t_{90}/t_{60}	t_{90}/t_{70}	t_{90}/t_{80}
ЭДМА-С	2,504132	2,295455	2,096886	1,88785	1,660274	1,393103
ЭДМА-К	2,530364	2,306273	2,155172	1,865672	1,631854	1,367615



Зависимость относительных затрат энергии при измельчении какаоветлы от содержания в продукте готового класса (1,8 мм)

Выявленная закономерность позволяет моделировать процесс промышленной переработки какаоветлы в лабораторных условиях при условии адекватности силовых и энергетических воздействий на частицы продукта в магнитооживленном слое рабочих объемов ЭМДА.

Заключение

В результате исследований кинетических закономерностей изменения гранулометрического состава какаоветлы в ЭДМА получено уравнение кинетики, удовлетворяющее граничным условиям процесса измельчения. Уравнение кинетики позволяет определять относительные затраты энергии

на обработку продукта до стандартизированной степени измельчения и моделировать промышленное измельчение в лабораторных условиях.

Список литературы

1. Беззубцева М.М. Энергоэффективный способ электромагнитной активации // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 5. – С. 92–93.
2. Беззубцева М.М. Электромагнитный измельчитель // Патент России 2045195,1995. Бюл. № 7.
3. Беззубцева М.М., Волков В.С. Теоретические основы электромагнитной механоактивации. – СПб.: СПбГАУ, 2011. – 145 с.
4. Беззубцева М.М., Волков В.С. Прикладная теория способа электромагнитной механоактивации // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. – № 16. – Т. 3. – С. 93–96.

5. Беззубцева М. М., Волков В. С. Активатор для тонкого измельчения материалов // Инновационные технологии механизации, автоматизации и технического обслуживания в АПК: сборник материалов Международной научно-практической интернет-конференции. – Орел ГАУ, 2008. – С. 122–126.

6. Беззубцева М.М., Волков В.С. Теоретические исследования электромагнитного способа механоактивации // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 5. – С. 72–74.

7. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование физико-механических процессов в дисковом электромагнитном механоактиваторе (ЭДМА) // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 12. – Ч.1. – С. 116.

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

9. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование строения магнитного поля электромагнитных механоактиваторов (ЭММА) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 12. – С. 90–91.

10. Беззубцева М.М., Волков В.С. Оптимизация коэффициента объемного заполнения электромагнитных механоактиваторов (ЭММА) // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – № 3. – С. 70–71.

11. Беззубцева М.М., Волков В.С. Повышение энергоэффективности безотходной технологии производства корма. Материалы Международной научно-практической конференции / под. ред. А. В. Павлова. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2010.

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

13. Биленко Л.Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах / Л.Ф. Биленко. – М.: Наука, 1984. – 200 с.

14. Волков В.С. Электромагнитный измельчитель // Патент России 84263. – 2009. Бюл. № 19.

15. Калошина Е.Н., Борисенко Е.В. Способ получения корма для сельскохозяйственных животных // Патент России № 2251300. 2005. Бюл. № 13.

References

1. Bezzubceva M.M. Jenergoj effektivnyj sposob jelektromagnitnoj aktivacii Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija. 2012, no 5, pp. 92–93.

2. Bezzubceva M.M. Jelektromagnitnyj izmelchitel Patent Rossii 2045195, 1995. Bjul no 7.

3. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Teoreticheskie osnovy jelektromagnitnoj mehanoaktivacii. Spb., SPbGAU, 2011. 145 p.

4. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Prikladnaja teorija sposoba jelektromagnitnoj mehanoaktivacii Izvestija Mezhdun-

arodnoj akademii agrarnogo obrazovanija. 2013. Vol. 3, no 16, pp. 93–96.

5. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Aktivator dlja tonkogo izmel'chenija materialov Innovacionnye tehnologii mehanizacii, avtomatizacii i tehničeskogo obsluživanija v APK. Sbornik-materialov Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoi internet-konferencii. Orel, GAU. 2008, pp. 122–126.

6. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Teoreticheskie issledovanija jelektromagnitnogo sposoba mehanoaktivacii Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovanij. 2012, no 5, pp. 72–74.

7. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Issledovanie fiziko-mehaničeskikh processov v diskovom jelektromagnitnom mehanoaktivatore (JeDMA) Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija. 2012, no 12. Ch.1, p. 116.

8. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Issledovanie rezhimov raboty jelektromagnitnyh mehanoaktivatorov Uspehi sovremenogo estestvoznanija. 2012, no 8, pp. 109–110.

9. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Issledovanie stroenija magnitnogo polja jelektromagnitnyh mehanoaktivatorov (JeMMA) Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovanij. 2012, no 12, pp. 90–91.

10. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Optimizacija koj efficientsa objemnogo zapolnenija jelektromagnitnyh mehanoaktivatorov (JeMMA) Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2012, no 3, pp. 70–71.

11. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Povyšenijej energoj effektivnosti bezothodnoj tehnologii proizvodstva korma. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoi konferencii. Pod. red. A.V. Pavlova. Saratov, Izd-vo «KUBiK», 2010.

12. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Zubkov V.V. Issledovanie apparatov s magnitoožihennym sloem Fundamentalnye issledovanija. 2013, no 6. Ch.2, pp. 258–262.

13. Bilenko L.F. Zakonomernosti izmel'čeniija v barabannyh mel'nica. Moscow, Nauka, 1984. 200 p.

14. Volkov V.S. Jelektromagnitnyj izmelchitel. Patent Rossii 84263. 2009. Bjul. no 19.

15. Kaloshina E.N., Borisenko E.V. Sposob poluchenija korma dlja selskohozjajstvennyh zhivotnyh Patent Rossii no. 2251300. 2005. Bjul. no 13.

Рецензенты:

Ракутько С.А., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией энергоэффективных электротехнологий ГНУ СЗ НИИМЭСХ Россельхозакадемии, г. Санкт-Петербург;

Салова Т.Ю., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «ТиТ» «Санкт-Петербургский аграрный университет», г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 17.10.2013.