

УДК 621.311(075)

**ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПОСОБА МЕХАНОАКТИВАЦИИ**

**Беззубцева М.М., Волков В.С.**

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

В статье представлены результаты прикладных исследований электромагнитного способа механоактивации на примере диспергирования шоколадных масс. Приведена экспериментально-статистическая модель процесса диспергирования рецептурной смеси сахара и какао электромагнитным способом на электромагнитном механоактиваторе (ЭММА), представляющим предмет изобретения. Анализ модели подтвердил теоретические исследования, положенные в основу формирования энергоэффективного способа активации. Приведены результаты оптимизации, позволяющие выявить режимы работы устройства, при которых достигается оптимальное силовое воздействие и стандартизованная величина степени измельчения шоколадной массы с высокой однородностью ее гранулометрического состава.

**Ключевые слова:** электромагнитные механоактиваторы, шоколадная масса, математическая модель

**APPLIED RESEARCH ELECTROMAGNETICALLY MECHANOACTIVATION**

**Bezzubceva M.M., Volkov V.S.**

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

The article presents the results of applied research electromagnetic method of mechanical activation on the example of the dispersion of chocolate masses. Given experimentally-statistical model of dispersion process prescription a mixture of sugar and cocoa electromagnetic method electromagnetic mechanoactivation (EMMA), representing the subject invention. The analysis of the model confirmed the theoretical research underlying the formation of energy-efficient type of activation. The results of optimization, which allows to identify the modes of operation of the device, whereby optimum force and a standardized value of the degree of grinding of chocolate mass with high homogeneity of its particle size distribution.

**Keywords:** electromagnetic mehanoaktivatory, chocolate mass, mathematical model

Наиболее полное математическое описание процессов измельчения твердых тел осуществляется в настоящее время методом экспериментально-статистических исследований. Ценность экспериментально-статистических моделей процесса, полученных на основе этого метода, заключается в том, что они, во-первых, дают информацию о влиянии факторов; во-вторых, позволяют количественно определить значения функций отклика при заданных режимах работы ведения процесса; и, в-третьих, могут служить основой для оптимизации. Целью математического описания процесса диспергирования рецептурной смеси сахара и какао электромагнитным способом являлось построение интерполяционной формулы, подтверждающей теоретические положения способа создания диспергирующего усилия с применением постоянного по знаку и регулируемого по величине электромагнитного поля [1, 2, 3, 4, 5].

Целью исследования является подтверждение теоретических исследований, положенных в основу формирования электромагнитного способа механоактивации (на примере измельчения рецептурных смесей шоколадных масс).

**Материалы и методы исследований**

Режимы работы электромагнитных механоактиваторов (ЭММА), при которых достигается оптимальное силовое взаимодействие между ферроэлементами в магнитоожигенном слое, обеспечивающее стандартизованную степень измельчения шоколадной массы с высокой однородностью гранулометрического состава ее твердой фазы. Используются экспериментально-статистические методы исследования.

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

Для описания исследуемого процесса была применена линейная модель – алгебраический полином 1-й степени

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \dots b_i X_i, \quad (1)$$

где  $Y$  – выходной параметр процесса, в данном случае степень измельчения шоколадных масс, %;  $X_1, X_2, \dots, X_i$  – независимые переменные, факторы, определяющие ход процесса.

Определение коэффициентов полинома (1) производится в результате факторного эксперимента, сущность которого состоит в одновременном варьировании определяющих факторов по разработанному плану.

Опыт работы кондитерских предприятий, результаты научных исследований,

а также проведенные эксперименты показали [6, 7, 8, 9], что на процесс измельчения шоколадных масс может оказывать влияние большое количество факторов механического и технологического характера. Наличие большого количества управляемых факторов усложняет получение основных закономерностей изучаемого процесса и требует критического подхода к исследованию их влияния на процесс диспергирования в ЭММА. Выбор существенных факторов при математическом моделировании определяется постановкой задачи, условиями проведения эксперимента, а также состоянием теоретических предпосылок в этой области [10, 11]. Анализ влияющих факторов показал, что часть из них принимается строго определенной, исходя из конструктивно-технологических соображений и на основании предварительной информации [12]. Фиксированными механическими факторами являются: материал и размер рабочей камеры, форма, размер и материал мелющих тел, коэффициент заполнения рабочего объема обрабатываемым продуктом [13]. В качестве

фиксированных технологических факторов установлены: соотношение рецептурных компонентов, содержание жира, начальный размер частиц смеси [14].

Представление о роли различных факторов, а также оценки «силы их влияния», полученной на основании предварительных экспериментов, позволили выделить три основных фактора, влияющих на процесс диспергирования шоколадных масс в ЭММА: индукция в рабочем объеме  $B_0$ , частота вращения внутреннего цилиндра  $n$ , коэффициент заполнения рабочего объема мелющими телами  $K_{пэ}$ . Таким образом, необходимо исследовать зависимость

$$D_{\delta\phi 30} = \varphi(B, n, K_{пэ}). \quad (2)$$

Априори определенное факторное пространство представлено в табл. 1. Матрица планирования и результаты экспериментов на этих уровнях представлены в табл. 2.

Опыты были дублированы и рандомизированы во времени. По результатам полного факторного эксперимента рассчитаны коэффициенты регрессии и получено следующее уравнение регрессии:

$$Y = 93 + 1,687X_1 + 1,187X_2 + 3,06X_3 + 0,3125X_{12} - 0,3125X_{13} - 0,1878X_{23} - 0,1875X_{123}. \quad (3)$$

Факторное пространство

Таблица 1

Наименование факторов	Уровни варьирования			Диапазон варьирования
	-1	0	+1	
Индукция в рабочем объеме $B$ , Гл	0,3	0,35	0,4	0,05
Частота вращения внутреннего цилиндра $n$ , $c^{-1}$	22	23	24	1
Коэффициент заполнения мелющими телами $K_{пэ}$	0,31	0,33	0,35	0,02

Максимальная из рассчитанных построчных дисперсий  $\max S_j^2 = 2$ ; сумма всех дисперсий по  $N$  строкам матрицы планирования  $\sum_{j=1}^N S_j^2 = 7,5$ ; критерий Кохрена  $G_p = 2/7,5 = 0,26$ .

Экспериментальная величина  $G_p$  критерия не превышает табличного значения  $G_T = 0,68$  (для степеней свободы  $f_1 = 1$ , общего количества оценок дисперсий  $f_2 = 8$  и уровня значимости  $p = 0,05$ ), а следовательно гипотеза об однородности дисперсий принимается.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты экспериментов

Номер опыта	Значение факторов в натуральном масштабе			Кодированные значения факторов								Результат опыта, дисперсность смеси $D_{\delta\phi 30}$ , %
	$B$	$n$	$K_{пэ}$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	
8; 13	0,3	22	0,35	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	94,0
3; 12	0,4	22	0,31	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	90,0
11; 15	0,3	24	0,31	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	89,0
6; 14	0,4	24	0,35	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	98,5
2; 4	0,3	22	0,31	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	87,0
5; 7	0,4	22	0,35	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	96,5
1; 9	0,3	24	0,35	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	95,5
10; 16	0,4	24	0,31	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	94,0

**Таблица 3**  
Результаты расчета построчных дисперсий

Опыт	$Y_1$	$Y_2$	$Y$	$\Delta Y$	$\Delta Y^2$	$S_j^2$
1	93	95	94	1	1	2
2	89	91	90	1	1	-2
3	89	89	89	0	0	0
4	98	99	98,5	0,5	0,25	0,5
5	85	89	87	1	1	2
6	96	97	96,5	0,5	0,25	0,5
7	95	96	95,5	0,5	0,25	0,5
8	94	94	94	0	0	0

Проверка значимости коэффициентов производилась для каждого коэффициента сравнением его абсолютного значения  $b_i$  и доверительного интервала  $|b_i| > |\Delta b_i|$ .

Доверительный интервал  $\Delta b_i$  определялся по формуле  $\Delta b_i = \pm t_T S_{b_i}$  (здесь  $t_T$  – табличное значение критерия Стьюдента, определяемое по числу степеней свободы  $f_0$  для уровня значимости  $p = 0,05$ ;  $S_{b_i}$  – среднеквадратичное отклонение  $b_i$ ). Величина  $t_T$  критерия равна 2,31 для  $p = 0,05$  и  $f_0 = 8$ , дисперсия  $S_{b_i}^2 = 0,116$ . Тогда доверительный интервал  $\Delta b_i = 0,34 \cdot 2,31 = 0,785$ . Абсолютные величины коэффициентов регрессии  $b_1, b_2$  и  $b_3$  больше доверительного интервала, следовательно, гипотеза о незначимости этих коэффициентов отвергается. Коэффициенты регрессии  $b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$  незначимы и соответствующие им члены можно исключить из уравнения регрессии.

Результаты расчета остаточной суммы квадратов при проверке адекватности линейной модели

$$Y = 93 + 1,687X_1 + 1,187X_2 + 3,06X_3 \quad (4)$$

приведены в табл. 4.

**Таблица 4**  
Результаты расчета остаточной суммы квадратов

Опыт	$Y$	$\hat{Y}$	$\Delta Y = Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$
1	94	93,1	0,9	0,81
2	90	90,44	0,44	0,1936
3	89	89,34	0,44	0,1936
4	98,5	98,9	0,4	0,16
5	87	87	0	0
6	96,5	96,56	0,06	0,0036
7	95,5	95,56	0,06	0,0036
8	94	92,8	1,2	1,44

Уравнение регрессии считается адекватным, если выполняется условие  $F_p < F_T$  (здесь  $F_p$  и  $F_T$  – соответственно расчетное

и табличное значения критерия Фишера). Дисперсия адекватности  $S_{\Delta d}^2 = 1,4$ , критерий Фишера  $F_p = 1,5$ . Табличное значение критерия Фишера для чисел степеней свободы  $f_{\Delta d} = 4$  и  $f_0 = 8$  равно 3,84. Таким образом, экспериментальная величина  $F_p$  критерия не превышает табличного значения и гипотеза об адекватности модели принимается.

Интерпретация полученных результатов заключается в установлении «силы и направления влияния» управляющих факторов, а также в проверке правильности представлений, положенных в основу электромагнитного способа создания измельчающего усилия. Величина коэффициентов регрессии является количественной мерой «силы влияния» факторов, а о характере их влияния говорят знаки коэффициентов. Анализируя полученное уравнение регрессии, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на процесс измельчения шоколадных масс на ЭММА оказывает фактор  $X_3$  (коэффициент заполнения рабочего объема мелющими телами), в меньшей мере, но также значительно влияет фактор  $X_2$  (индукция в рабочем объеме) и фактор  $X_1$  (частота вращения внутреннего цилиндра). Знак плюс при коэффициентах линейной регрессии свидетельствует, что с увеличением значения факторов растет величина параметра оптимизации, т.е. степень измельчения шоколадных масс увеличивается и процесс диспергирования интенсифицируется. Таким образом, интерпретация полученного уравнения регрессии подтвердила предпосылки, положенные в основу создания измельчающего усилия, реализованного в ЭММА. Экспериментально-статистическая математическая модель процесса диспергирования шоколадных масс на ЭММА, представленная в виде адекватного линейного полинома использовалась для поиска области оптимума объекта исследования. Оптимизация процесса измельчения осуществлялась методом крутого восхождения.

При анализе качества и экономичности приготовления полуфабрикатов шоколадного производства наряду с дисперсностью важным показателем является однородность смеси. Поэтому в качестве ограничивающего параметра была введена в рассмотрение экспериментально найденная функция отклика  $Y_\sigma$ , характеризующая однородность смеси  $\sigma$ . Расчет крутого восхождения и полученные результаты приведены в табл. 5. Здесь  $\hat{Y}$  и  $Y$  – соответственно расчетные и экспериментальные значения степени измельчения полуфабриката. Шаги движения

и координаты опытов крутого восхождения в кодированных переменных рассчитывались по формуле

$$X_i = (x_i - x_{0i})/\Gamma_i$$

(здесь  $X_i$  – кодированное значение фактора;  $x_i$  – натуральное значение фактора;  $x_{0i}$  – натуральное значение основного уровня;  $\Gamma_i$  – интервал варьирования) с использованием физических переменных  $x_1, x_2, x_3$  и шагов варьирования  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ , принятых ранее в полном факторном эксперименте. Установлено, что в опыте № 10 достигается граница области определения фактора  $x_3$ . В данном случае, согласно рекомендациям, был выбран вариант стабилизации этого фактора на данном уровне и дальнейшее продвижение по градиенту по остальным факторам.

на ЭММА следует считать условия опыта № 10. Для данных режимов работы величина силового взаимодействия между размольными элементами в структурных группах составляет 56,3 Н [16].

### Заключение

В результате оптимизации экспериментально-статической модели процесса измельчения шоколадных масс электромагнитным способом определены следующие значения режимных и силовых параметров работы ЭММА, при которых процесс диспергирования протекает с наибольшим эффектом: электромагнитный режим  $B = 0,37$  Тл, скоростной режим  $n = 23,4$  с<sup>-1</sup>, коэффициент заполнения рабочей камеры размольными элементами  $K_{\text{за}} = 0,35$ , величина диспергирующего усилия  $F_r = 56,3$  Н. При этом

Таблица 5

Оптимизация процесса методом крутого восхождения

Характеристика и номер опыта		Физические значения факторов			Кодированные значения факторов			Функция отклика		
Центр плана		0,35	23	0,33	0	0	0	93	93	–
Интервал варьирования		0,05	1,0	0,22	1,0	1,0	1,0	–	–	–
Шаг движения		0,01	0,2	0,01	0,2	0,2	0,5	–	–	–
Крутое восхождение										
Опыт	№ 9	0,36	23,2	0,34	0,2	0,2	0,5	95,0	95,1	–
	№ 10	0,37	23,4	0,35	0,4	0,4	1,0	97,2	97,2	1,55
	№ 11	0,38	23,6	0,35	0,6	0,6	1,0	97,6	97,7	1,7
	№ 12	0,39	23,8	0,35	0,8	0,8	1,0	98,2	98,3	1,88
	№ 13	0,4	24,0	0,35	1,0	1,0	1,0	98,5	98,6	1,94

Анализ полученных данных показал, что в опыте № 13 на граничной области определения по факторам  $X_1$  и  $X_2$  достигнута максимальная дисперсность смеси, однако однородность смеси значительно хуже, чем в опыте № 10. В условиях опыта № 10 достигается оптимальное соотношение между однородностью  $\sigma = 1,55$  и максимально возможной степенью измельчения смеси  $D_{\delta 30} = 97,2\%$ . В этой связи оптимальным режимом проведения процесса измельчения шоколадных масс

достигается максимальная стандартизованная степень измельчения полуфабриката  $D_{\delta 30} = 97,2\%$  и высокая однородность его гранулометрического состава  $\sigma = 1,55$ . Доля фракций размером от 10 до 30 мкм составляет 65%, что в 2 раза больше по сравнению с продуктом помола, полученным классическим способом, предварительного и тонкого диспергирования рецептурных смесей шоколадных масс на традиционном измельчающем оборудовании.

**Список литературы**

1. Беззубцева М.М., Волков В.С. Теоретические исследования электромагнитного способа измельчения материалов (монография) // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 2–1. – С. 68–69.
2. Беззубцева М.М., Обухов К.Н. К вопросу исследования физико-механических процессов в магнитоожигенном слое ферротел // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 7–2. – С. 191–195.
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., Котов А.В., Обухов К.Н. Инновационные электротехнологии в АПК (учебное пособие) // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 2–2. – С. 221.
5. Беззубцева М.М., Волков В.С. Классификация электромагнитных механоактиваторов по технологическому назначению // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 8–1. С. 25–27.
6. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование закономерностей электромагнитной механоактивации в дисковом электромагнитном механоактиваторе (ЭДМА) // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2014. – С. 286–288.
7. Беззубцева М.М., Волков В.С. К вопросу исследования энергоэффективности механоактиваторов с магнитоожигенным слоем // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – С. 248.
8. Беззубцева М.М., Волков В.С. Теоретические исследования электромагнитного способа измельчения материалов (монография) // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 2–1. – С. 68–69.
9. Беззубцева М.М., Обухов К.Н. К вопросу исследования физико-механических процессов в магнитоожигенном слое ферротел // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 7–2. – С. 191–195.
10. Беззубцева М.М., Обухов К.Н. К вопросу исследования диспергирующих нагрузок в электромагнитных механоактиваторах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 8–5. – С. 847–851.
11. Беззубцева М.М., Волков В.С. К расчету энергоэффективных режимов работы механоактиваторов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 9–1. – С. 9–13.
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., Котов А.В., Обухов К.Н. К вопросу исследования зависимости технологического эффекта измельчения рецептурных компонентов шоколадного производства от режимов работы электромагнитных механоактиваторов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 358.
14. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н. Электромагнитная механоактивация полуфабрикатов шоколадного производства // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 3–1. – С. 73–74.
15. 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.
16. Беззубцева М.М. Теоретические основы электромагнитного измельчения. – СПб.: СПбГАУ, 2005. – 154 с.