

УДК 663.031

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РЕЦЕПТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ ШОКОЛАДНЫХ МАСС В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДИСПЕРГАТОРАХ**

**Беззубцева М.М., Волков В.С., Ружьев В.А., Петропавлова С.В.**

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

В современных условиях в связи с удорожанием импортного сырья какао-бобов приоритетными становятся исследования по оптимизации аппаратно-технологических схем шоколадного производства. В статье представлены результаты исследований процесса измельчения дисперсной фазы шоколадных масс (смеси сахара и какао) на аппарате нового типа – электромеханическом диспергаторе (ЭМД), конструктивная схема которого и принцип действия представляют предмет изобретения и защищены патентом РФ. Выявлено, что используемые в настоящее время на предприятиях отрасли аппаратно-технологические схемы с многостадийной операцией измельчения способствуют переизмельчению материала и перераспределению гранулометрического состава частиц в область мелких фракций. Доказано, что присутствие фракций размером менее 10 мкм вызывает в процессе приготовления шоколадных масс перерасход какао-масла. Мелкие частицы увеличивают адсорбционную поверхность, что и вызывает перерасход этого дорогостоящего импортного сырья, добавляемого согласно рецептуре к полуфабрикату для достижения требуемой технологией вязкости. Кроме того, внедрение дополнительного оборудования приводит к удорожанию производства, снижению показателя энергоэффективности, повышению энергоемкости производимой продукции и в конечном итоге повышению цен на готовые шоколадные изделия. Результаты исследований показали, что одностадийное измельчение в ЭМД позволяет получить продукт с заданным технологией гранулометрическим составом, что способствует улучшению качества и экономии дорогого импортного ингредиента – какао-масла. Сокращение стадий диспергирования также способствует снижению себестоимости готового шоколада.

**Ключевые слова:** электромеханический диспергатор, компоненты шоколадных масс, оптимальный диапазон дисперсности

## **INVESTIGATION OF THE PROCESS OF GRINDING OF PRESCRIPTION COMPONENTS OF CHOCOLATE MASSES IN ELECTROMECHANICAL DISPERSANTS**

**Bezzubtseva M.M., Volkov V.S., Ruzhev V.A., Petropavlova S.V.**

*Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, e-mail: eopietvapk@mail.ru*

In modern conditions, due to the rise in the price of imported raw materials of cocoa beans, research on the optimization of hardware and technological schemes of chocolate production is becoming a priority. The article presents the results of studies of the process of grinding the dispersed phase of chocolate masses (a mixture of sugar and cocoa) on a new type of apparatus – an electromechanical dispersant (EMD), the design scheme of which and the principle of operation are the subject of the invention and are protected by a patent of the Russian Federation. It is revealed that the hardware and technological schemes currently used at the enterprises of the industry with a multi-stage grinding operation contribute to the re-grinding of the material and the redistribution of the particle size distribution in the area of small fractions. It is proved that the presence of fractions with a size of less than 10 microns causes an overspend of cocoa butter in the process of preparing chocolate masses. Fine particles increase the adsorption surface, which causes an overspend of this expensive imported raw material, which is added according to the recipe to the semi-finished product to achieve the viscosity required by the technology. In addition, the introduction of additional equipment leads to an increase in the cost of production, a decrease in energy efficiency, an increase in the energy intensity of the products produced and, ultimately, an increase in the prices of finished chocolate products. The results of the research showed that the single-stage grinding in the EMD allows you to get the product in the specified technology granulometric composition, which helps to improve the quality and save expensive imported ingredient-cocoa butter. Reducing the dispersion stages also helps to reduce the cost of finished chocolate.

**Keywords:** electromechanical dispersant, chocolate mass components, optimal dispersion range

Согласно аналитике Центра отраслевой экспертизы, производство шоколада – это одна из немногих подотраслей АПК, где Россия экспортирует брендированный продукт с добавленной стоимостью, сделанный из зарубежных ингредиентов. На производные какао-бобов приходится до 80% сырьевой себестоимости кондитерских изделий. Согласно исследованию Россельхозбанка, потребление шоколада сократилось на более чем на 10% – с семи до шести килограммов на человека в год.

Агентство ИКАР понизило прогноз производства сахара в России в сезоне 2020/21 до 5,0–5,4 млн т против 5,6–6,0 млн т [1]. Приоритетным направлением снижения себестоимости такой социально значимой продукции, как шоколадные изделия, в современных условиях является оптимизация аппаратно-технологических схем производства с разработкой и внедрением импортозамещающих технологий и энергоэффективного оборудования отечественного производства.

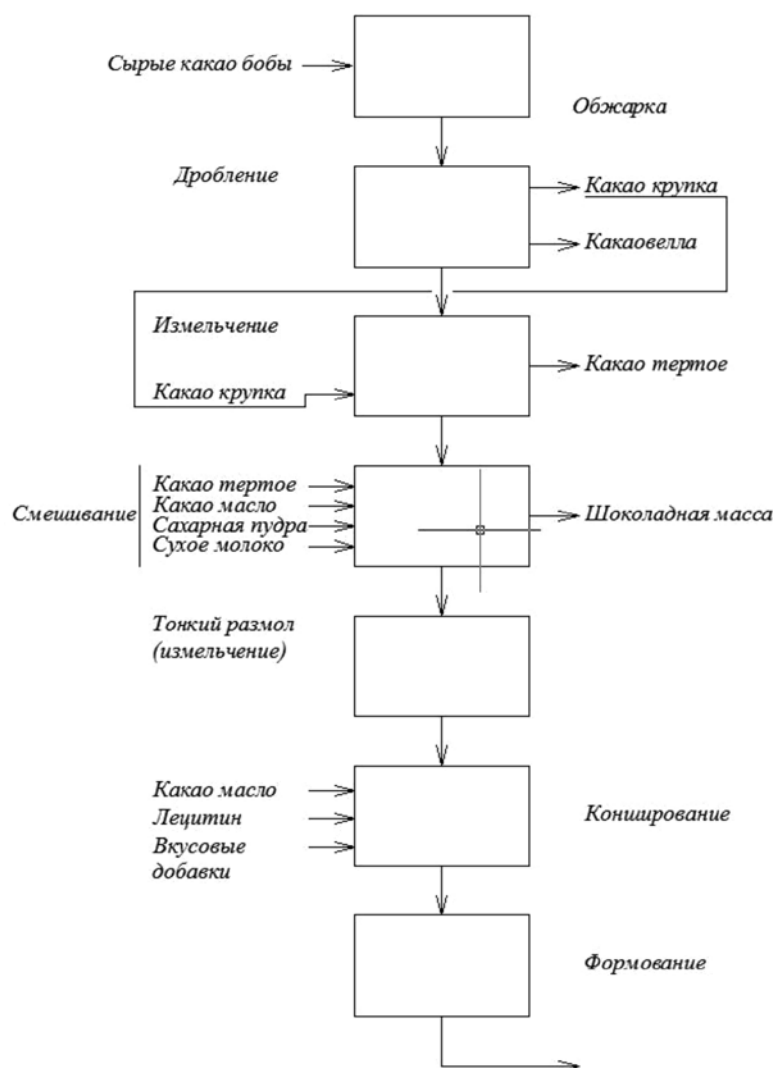


Рис. 1. Операционная схема производства

Цель исследования: улучшение качества и снижение себестоимости шоколадных изделий путем внедрения в аппаратно-технологическую схему производства энергоэффективного электромеханического диспергатора отечественной разработки.

#### Материалы и методы исследования

Исследования основаны на теории создания управляемых диспергирующих нагрузок в измельчителях с постоянным электромагнитным полем, использованы методы анализа, синтеза, экспериментально-статистического анализа, а также цифровые информационные технологии.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В России шоколад должен содержать не менее 35% какао-продуктов. В связи

с удорожанием импортных поставок какао-бобов некоторые производители решают эту проблему путем замены ингредиентов и вместо дорожающих какао-масел используют растительные масла со схожей температурой плавления, что, несомненно, снижает как вкусовые достоинства готового шоколада, так и его пищевую ценность. Между тем, как показали исследования, использование несовершенного механического оборудования для размала какао-бобов априори предусматривает необходимость использования в технологической схеме производства многостадийности операции измельчения [2]. Введение в аппаратно-технологическую схему дополнительного оборудования (мельниц среднего и тонкого помола, классификаторов) является вынужденной мерой, обусловленной требованием стандарта к регламентированному значению

степени измельчения частиц дисперсной фазы. Многостадийность операции измельчения вызывает переизмельчение материала и перераспределение гранулометрического состава частиц в область мелких фракций. Доказано, что присутствие фракций размером менее 10 мкм вызывает в процессе приготовления шоколадных масс перерасход какао-масла. Мелкие частицы увеличивают адсорбционную поверхность, что и вызывает перерасход какао-масла, добавляемого к полуфабрикату для достижения требуемой технологией вязкости продукта. Кроме того, внедрение дополнительного оборудования приводит к удорожанию производства, снижению показателя энергоэффективности, повышению энергоемкости производимой продукции и в конечном итоге повышению цен на готовые шоколадные изделия.

Приоритетным направлением снижения цен на шоколадные изделия является внедрение в аппаратно-технологические линии предприятий инновационных технологий и энергоэффективного оборудования для переработки основных ингредиентов шоколада – какао-бобов и сахара [3, 4]. При этом необходимо отметить, что на себестоимость шоколада в значительной мере оказывает влияние и показатель энергоэффективности его производства.

Выявлено, что наибольшие затраты энергии в линиях производства приходится на многочисленные стадии измельчения (рис. 1).

Фракционный состав продукции, приготовленной по схемам классических линий переработки какао-бобов, представлен в таблице.

Фракционный состав продукции, приготовленной по схемам классических линий переработки какао-бобов

Размер фракции, мкм	Массовая доля частиц (%)		
	Wiener	ПКБ МПП	Классическим способом
63–30	2,0	2,8	2,8
30–10	24,2	25,2	29,5
менее 10	73,8	72,0	67,7
степень измельчения, %	98,0	97,8	97,8

Анализ представленных данных свидетельствует о недопустимо высоком содержании частиц размером менее 10 мкм. Этот показатель не регламентирован стандартом, но влияет на перерасход дорогостоящего импортного сырья [5]. При уменьшении размера частиц от 10 до 2 мкм удельная поверхность возрастает в 5 раз [6, 7].

С целью интенсификации процессов, сокращения стадий диспергирования и улучшения качественных показателей шоколадных масс при одновременном повышении энергоэффективности производства разработан электромеханический диспергатор (ЭМД), представленный на рис. 2.

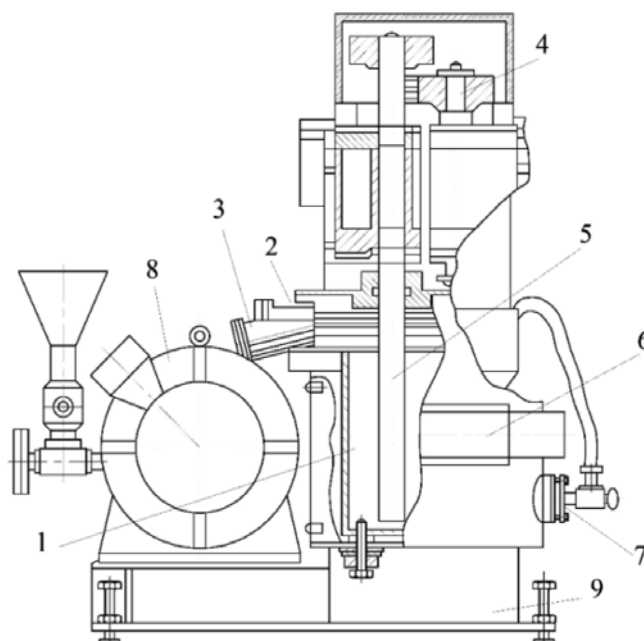


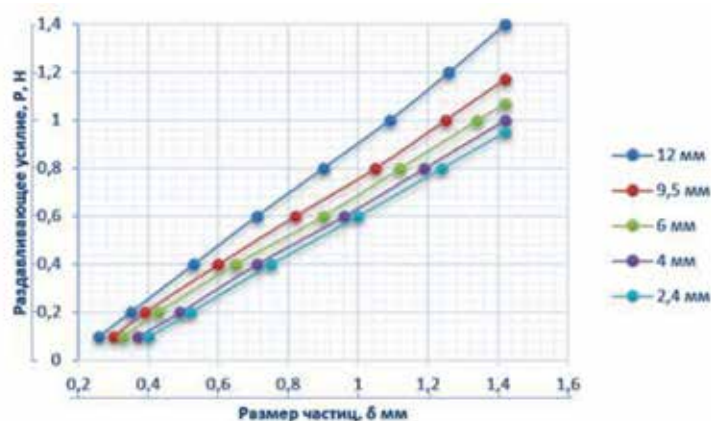
Рис. 2. Конструкция ЭМД (Патент РФ № 2007094) [8]: 1 – корпус; 2 – рабочий объем; 3, 4 – штуцера; 5 – ротор; 6, 7 – электромагнит с обмоткой управления; 8 – насосный агрегат; 9 – основание

Преимуществом ЭМД является возможность тонкого и надежного управления энергетическими и силовыми условиями, обеспечивающими рациональный расход энергии на проведение процесса измельчения материалов [9]. Основным исходным параметром для энергоэффективного диспергирования является зависимость раздавливающего усилия  $P$  частиц измельчаемого продукта от конструктивных размеров и режимных параметров ЭМД. Для установления значений этих параметров проведены исследования на копре 5033А по стандартным методикам с погрешностью не более 1% [10].

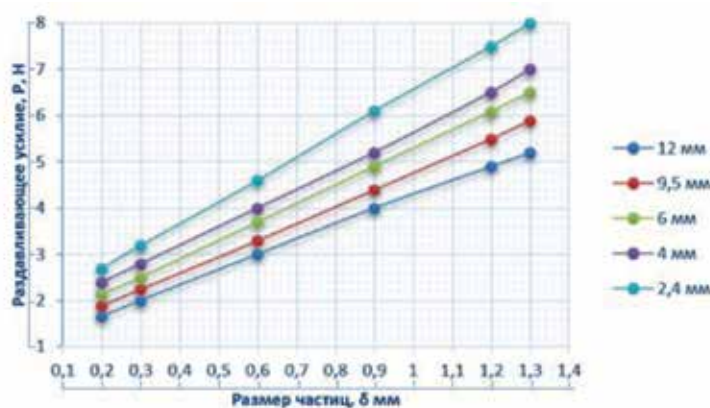
Результаты исследований представлены на рис. 3.

Поиск рациональных силовых и энергетических режимов работы ЭМД и их согласование с условиями разрушения частиц дисперсной фазы полуфабрикатов шоколадной массы – смеси сахара и какао

проводили с использованием программного комплекса ANSYS по алгоритму расчета и методологической базе, опубликованных в работах [2, 9]. Выявлено, что основным параметром, влияющим на силовые условия измельчения материала, является величина индукции электромагнитного поля в рабочем объеме ЭМД, которую в экспериментальных исследованиях определяли портативным миллитесламетром ТПУ. Погрешность прибора, обусловленная возможной неверной ориентацией зонда, лежит в пределах  $\pm 0,25\%$ . Адекватность математических моделей [9] и результатов экспериментальных исследований, проведенных по методике [2], устанавливали на экспериментальных стендах «Электромагнит ФЛ-ЭМД 3», моделирующим физико-механические процессы в рабочих объемах ЭМД и, в частности, силовые контакты между ферромагнитными размольными элементами в их магнитооживленном слое.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость раздавливающего усилия  $P$ , создаваемого размольными элементами сферической формы с диаметрами  $d = 2\text{--}12$  мм от размера частиц  $\delta$  (а) какао, (б) сахара

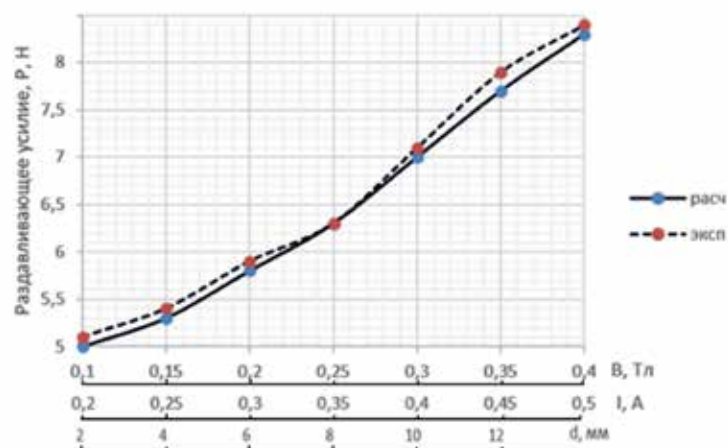


Рис. 4. Зависимость силовых взаимодействий между раздольными элементами ЭМД от величины силы тока ( $I$ ) в обмотке управления, индукции ( $B$ ) электромагнитного поля и размера ферромагнитных элементов шарообразной формы ( $d$ )

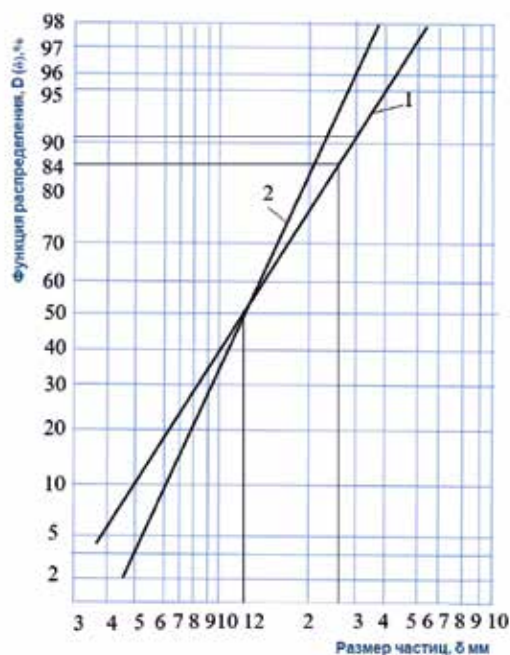


Рис. 5. Функции распределения частиц шоколадной массы при значениях электромагнитной индукции  $B, Тл$ : 1 —  $B = 0,15 Тл$ ; 2 —  $B = 0,25 Тл$

В результате теоретических и экспериментальных исследований получены функциональные зависимости силовых нагрузок от параметров магнитного поля в рабочем объеме ЭМД и установлен рациональный диапазон силовых контактов в системе шар-частица-шар для условий энергоэффективной механоактивации дисперсной фазы шоколадной массы (рис. 4).

Методом экспериментально-статистического анализа [2] установлено, что сред-

нее квадратическое отклонение расчетных и фактических значений на всем интервале измерений составляет не более 1,95%.

Результаты исследований процесса измельчения смеси сахара и какао с показателем  $n_s = 2$  [2, 5] выборочно представлены на рис. 5 при значениях индукции 0,15 и 0,25 Тл.

Гранулометрический состав продуктов помола определяли лазерным анализатором частиц ЛАСКА Т(Д) спосо-

бом лазерной дифракции с соблюдением ГОСТ Р 54052-2010 [11]. Погрешность измерений составляла не более 0,4%. Выявлено, что переработка полуфабриката при значениях электромагнитной индукции в рабочем объеме аппарата  $B = 0,25$  Тл, частоте вращения ротора  $20,4\text{с}^{-1}$ , коэффициенте заполнения рабочего объема мелющими феррошарами диаметром 12 мм  $K = 0,4$ , позволяет получить продукт с высоким показателем однородности  $\vartheta = 1,66$  [12] и степенью измельчения  $D = 96\%$ , что отвечает требованиям технологии приготовления сортов десертного шоколада. При этом установлено, что массовая доля частиц в диапазоне дисперсности от 10 до 30 мкм увеличивается до 66% за счет уменьшения массовой доли частиц размером менее 10 мкм, что и способствует экономии дорогого импортного ингредиента – какао-масла и, соответственно, снижению себестоимости готового шоколада. По сравнению с классическим способом производства доля частиц в диапазоне дисперсности от 10 до 30 мкм увеличивается примерно в 2 раза (таблица).

Согласно теории способа электромагнитной механоактивации [2, 9] в электромагнитном режиме работы при  $B = 0,15$  Тл не соблюдается условие равномерной и целенаправленной (с разностью скоростей) переориентации феррочастиц (размольных элементов магнитоожигенного слоя) в рабочем объеме ЭДМ, т.е. не достигается основное условие равномерного распределения силового поля в зоне обработки продукта.

### Заключение

Представленные в статье результаты исследований доказывают, что высокий показатель селективности представленного в статье способа дезинтеграции обеспечивается возможностью установления необходимых силовых и энергетических параметров в магнитоожигенном слое размольных элементов (ферротел) относительно

но прочности диспергируемых материалов. На конкретной технологии измельчения шоколадных масс показана перспективность внедрения ЭМД в аппаратно-технологические схемы переработки сырьевых продуктов, технологии которых предусматривают получение готовых изделий (или их полуфабрикатов) с гранулометрическим составом частиц в узком и оптимальном диапазоне дисперсности.

### Список литературы

1. Анализ импортных поставок какао-сырья в Россию. Выпуск: апрель, 2021 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://roif-expert.ru/food/kofe-kakao/rynok-kakao-syr-ya/analiz-importnyh-postavok-kakao-syr-ya-v-rossiyu.html> (дата обращения: 22.05.2021).
2. Беззубцева М.М., Волков В.С. Методология исследований способа электромеханического диспергирования: монография. СПб.: СПбГАУ, 2021. 189 с.
3. Черных И.А., Калманович С.А., Красина И.Б., Вербицкая Е.А., Красин П.С. Новые технологии переработки какао-продуктов и получения шоколада: монография. Краснодар: Изд. ФГБОУ ВПО «КубГУ», 2015. 144 с.
4. Tarasenko N.A., Plomodyalo R.L., Krasina I.B., Nikonovich Y.N., Krasin P.S. Variation of granulometric composition of dietary fibers by milling them in a vertical mill. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017. Vol. 33. Issue 1. P. 1067–1074.
5. Какао, шоколад, пралине. Пер. с нем.; под ред. Т.П. Ермаковой. М.: Пищевая промышленность, 2006. 320 с.
6. Юшина Ю.К., Вострикова Н.Л., Становова И.А. Экспресс-методы анализа пищевых продуктов // *Пищевая промышленность*, 2011. № 4. С. 32–33.
7. Хопунов Э.А. Основы дезинтеграции руд и техногенных материалов (теория, эксперимент, технологии): монография. М.: РУСАЙТ, 2016. 474 с.
8. Беззубцева М.М., Беззубцев А.Е., Азаров Н.Н., Азаров Ю.Н. Электромеханическое устройство для обработки шоколадных масс // Патент России № 2007094, 1994. Бюл. № 3.
9. Bezzubtseva M.M., Volkov V.S., Krishtopa N.Yu., Mastepanenko M.A., and Gabrielyan Sh.Zh. The Challenge of Sustainability in Agricultural Systems. 2021. Vol. 2. P. 929–939.
10. ГОСТ 108-2014. Какао-порошок. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
11. ГОСТ Р 54052-2010 Изделия кондитерские. Методы определения степени измельчения шоколада, шоколадных изделий, полуфабрикатов производства шоколада, какао и глазури. М.: Стандартинформ, 2012. 8 с.
12. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // *ДАН СССР*. 1941. Т. 31. С. 99–101.