

УДК 621.43.036.9

**ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ****Беззубцева М.М., Волков В.С.***ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»,  
Санкт-Петербург, e-mail: mesnegana@mail.ru*

В статье представлены результаты исследований электромагнитных смесителей, принцип действия которых основан на методе электромагнитной механоактивации в магнитоожигенном слое ферромагнитных цилиндрических тел (мешалок), размещенных в камерах обработки аппаратов совместно с перерабатываемыми смесями материалов различного целевого назначения в пищевых, строительных, комбикормовых, молочных и других производствах. Представлен алгоритм расчета и методика исследования тепловых характеристик электромагнитных смесителей двух конструктивных модификаций, защищенных патентами на изобретение. В качестве модельных систем выбраны смеси для приготовления шоколадных масс в кондитерском производстве (сахар и какао) с органолептическим показателем  $n_i = 2$ . Исследования проведены в номинальных режимах работы электромагнитных смесителей, при которых достигается заданная технологическими требованиями однородность перерабатываемых смесей. Приведена схема экспериментальной установки, предназначенной для изучения тепловых режимов работы электромагнитных смесителей. Представлен кондуктомер, специальная конструкция которого обеспечивает возможность установления теплопроводности наполнителя (смеси ферроэлементов – мешалок цилиндрической формы и перерабатываемых материалов) рабочей камеры электромагнитных смесителей. Температурный режим переработки продукта в рабочих камерах исследуемых устройств обеспечивался отводом части теплоты через цилиндрическую поверхность рабочей камеры ЭМС. При описании источника тепловых потерь учтены физико-механические процессы, происходящие в магнитоожигенном слое ферротел под действием сил и моментов электромагнитного поля при относительном смещении рабочих поверхностей устройства. Адекватность математических моделей реальным процессам подтверждена многочисленными экспериментами на ЭМС различных конструктивных модификаций. Исследования проведены в рамках ведущей научной и научно-педагогической школы «Эффективное использование энергии, интенсификация электротехнологических процессов», зарегистрированной в реестре научных школ Санкт-Петербурга.

**Ключевые слова:** электромагнитные смесители, тепловые характеристики, кондуктомер**THERMAL CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC MIXERS****Bezzubtseva M.M., Volkov V.S.***Saint Petersburg State Agrarian University, St.-Peterburg, e-mail: mysnegana@mail.ru*

The article presents the results of research of electromagnetic mixers, the principle of operation of which is based on the method of electromagnetic mechanical activation in a magnetically liquefied layer of ferromagnetic cylindrical bodies (agitators) placed in the processing chambers of devices together with recyclable mixtures of materials for various purposes in food, construction, feed, dairy and other industries. An algorithm for calculating and studying the thermal characteristics of electromagnetic mixers of two design modifications protected by patents is presented. As model systems, mixtures for the preparation of chocolate masses in confectionery production (sugar and cocoa) with an organoleptic indicator were selected. The research was carried out in the nominal operating modes of electromagnetic mixers, which achieve the uniformity of the processed mixtures specified by the technological requirements. The scheme of an experimental installation designed to study the thermal operation modes of electromagnetic mixers is presented. A conductor meter is presented, whose special design makes it possible to establish the thermal conductivity of the filler (a mixture of ferroelements-stirrers of cylindrical shape and recyclable materials) of the working chamber of electromagnetic mixers. The temperature regime of product processing in the working chambers of the devices under study was provided by the removal of part of the heat through the cylindrical surface of the EMC working chamber. In the description of the source of thermal losses taken into account physico-mechanical processes in magnetic liquefied layer of ferroelements under the action of forces and moments electromagnetic field at a relative offset of the working surfaces of the device. The adequacy of mathematical models to real processes has been confirmed by numerous experiments on EMC of various design modifications. The research was carried out within the framework of the leading scientific and scientific-pedagogical school «Efficient use of energy, intensification of electro technological processes», registered in the register of scientific schools in Saint Petersburg.

**Keywords:** electromagnetic mixers, heat range, conductivity meter

Перемешивание является одним из первостепенных процессов, определяющих качество готовых изделий. Наиболее перспективными являются смесители, обеспечивающие процесс переработки по всему рабочему объему камеры устройства без застойных зон и «воронок», которые образуются при использовании наиболее рас-

пространенных в промышленности лопастных мешалок [1]. Кроме того, современные требования, предъявляемые к функционированию перерабатывающих предприятий, диктуют необходимость повышения такого важного показателя, как энергоэффективность технологических процессов [2]. В настоящее время в практику производства

внедряются аппараты с магнитоожигенным слоем рабочих элементов, размещенных в камере обработки в смеси с перерабатываемым продуктом [3, 4]. Исследования показали, что внедрение в аппаратурно-технологические схемы предприятий аппаратов нового типа – электромагнитных смесителей (ЭМС) позволяет значительно улучшить показатели процесса перемешивания (показатели интенсивности и эффективности) при одновременном снижении энергоемкости готовых продуктов [4].

Цель исследования: обоснование тепловых характеристик электромагнитных смесителей.

### Материалы и методы исследования

Научные исследования проведены с использованием как экспериментальных, так и теоретических методов. Использованы методы анализа и синтеза, методы статистической обработки данных и планирования эксперимента.

### Результаты исследования и их обсуждение

Выявлено, что при перемешивании в электромагнитных смесителях (ЭМС) [5, 6] большой мощности наблюдается повышение температуры перерабатываемых продуктов. Превышение допустимой температуры выше номинальной обуславливает как ухудшение качества продукции, так и эксплуатационные характеристики аппаратов. В этой связи вопросы, связанные с изучением и анализом тепловых процессов, происходящих в ЭМС, являются актуальными при проектировании надежно работающих аппаратов. В результате теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что основным источником теплового воздействия на продукт являются потери, обусловленные процессами трения между перемешивающими органами в рабочей камере ЭМС [7]. При скорости вращения ротора  $n$  эти потери можно определить по формуле

$$P_{2T} = K_M M_C n,$$

где  $K_M$  – коэффициент масштабного перехода ( $K_M < 1$ ).

$M_C$  – момент вращения, передаваемый цилиндрическим мешалкам.

Необходимо также учитывать тепловой поток, поступающий в рабочую камеру от обмотки управления в (ОУ) с постоянным электрическим током  $I_y$ :

$$P_{yT} = I_y^2 \frac{\rho_H}{\rho_0} R_{y0}, \quad (1)$$

где  $\rho_H$  и  $\rho_0$  – удельные сопротивления ОУ;

$R_{y0}$  – сопротивление ОУ при температуре среды.

Суммарные тепловые потоки определены выражением

$$P_T = I_y^2 R_{y0} \frac{\rho_H}{\rho_0} + K_M M_C n. \quad (2)$$

Для конструкций ЭМС с цилиндрическим корпусом справедливо равенство

$$P_T = I_y^2 R_{y0} \frac{\rho_H}{\rho_0} + \frac{1}{2} K_M P_\tau S_p h_0 n_1, \quad (3)$$

где  $P_\tau$  – тангенциальная составляющая силовых контактов между цилиндрическими мешалками, выполненными из ферромагнитного материала;

$S_p, h_0$  – геометрические размеры рабочей камеры ЭМС (площадь среднего сечения цилиндрической камеры и ширина рабочего объема).

Заданный технологией температурный режим переработки продукта обеспечивается отводом части теплоты через поверхность рабочей камеры ЭМС. В этой связи при конструировании ЭМС тепловой расчет имеет первостепенное значение. Обеспечение заданной температуры в рабочей камере ЭМС наиболее актуально при переработке термолабильных продуктов.

На рис. 1 и 2 представлены конструктивные схемы смесителей ЭМС-1 и ЭМС-2, представляющие предмет изобретения [6].

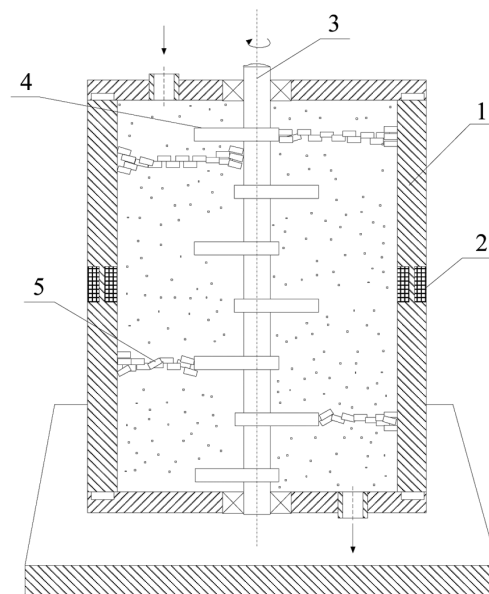


Рис. 1. Конструктивная схема смесителя ЭМС-1 (Патент России на полезную модель № 653): 1 – корпус; 2 – обмотка управления (ОУ); 3 – ротор; 4 – кольца из ферроэласта; 5 – цилиндрические ферромагнитные мешалки

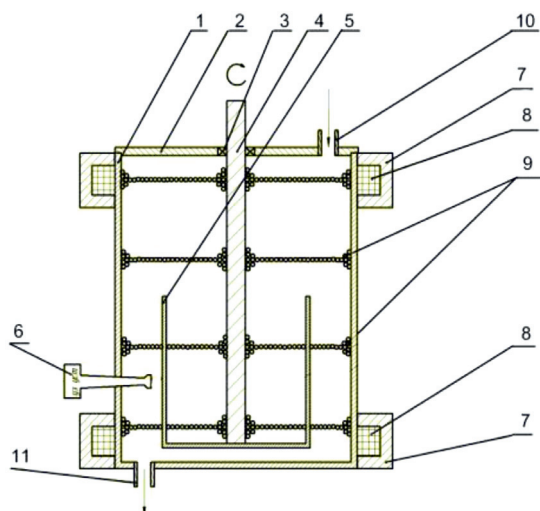


Рис. 2. Конструктивная схема смесителя ЭМС-2 (Патент России на полезную модель № 86493): 1 – цилиндрическая камера; 2 – крышка; 3 – подшипник; 4 – ротор; 5 – лопасти; 6 – источник УЗ; 7 – ферромагнитное кольцо; 8 – ОУ; 9 – ферромагнитные цилиндры; 10, 11 – патрубки для входа и выхода смеси

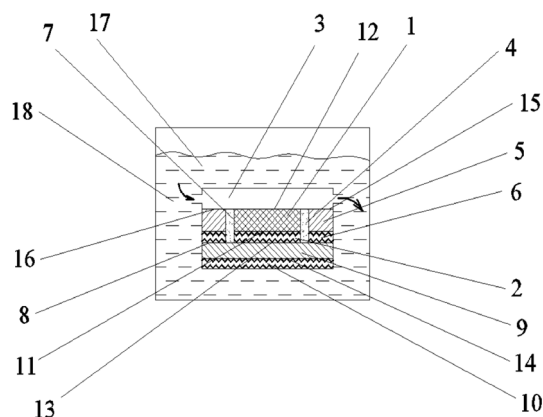


Рис. 3. Кондуктомер: 1 – диск из наполнителя; 2, 6, 10 – электронагреватели; 3 – холодильная коробка, поверхность коробки; 5 – теплоизолятор; 7 – кольцевая прослойка; 8 – поверхность теплоотдачи; 9 – теплоизоляционный материал; 11, 12 – термопары на горячей и холодной стороне наполнителя; 13, 14 – термопары

В алгоритмах тепловых расчетов технологических аппаратов, основанных на электромагнитных способах формирования силовых контактов [3], наибольшие сложности представляют вопросы, связанные с определением теплопроводности заполнителя рабочих камер. В ЭМС рабочая камера заполнена ферромагнитными цилиндрическими элементами (мешалками) и смесью перерабатываемых продуктов. Наиболее перспективным для определения теплопроводности заполнителя рабочих камер в ЭМС является специально разработанный для этих целей кондуктомер, конструктивная схема которого представлена на рис. 3.

Данная конструкция кондуктомера была успешно использована при изучении тепловых режимов работы аппаратов с магнитооживленным слоем. С помощью модели температурного поля прибора можно аналитически установить температуру элементов устройства.

Изучение тепловых режимов ЭМС проводилось с использованием экспериментальной установки, представленной на рис. 4.

Использованы стандартные приборы (вольтметры  $V$ , амперметры  $A$ , реостаты  $R$  и т.д.).

В качестве модельной системы выбраны смеси для приготовления шоколадных масс

(сахар и какао с органолептическим показателем  $n_c = 2$ ) [8, 9].

Расчеты проведены с использованием формул

$$\theta = \theta_m \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + \theta_0 \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right], \quad (4)$$

$$\theta_{PO} = \theta + \sum_{i=1}^n \Delta\theta,$$

$$\theta_{PO} = \frac{P_{YT} + P_{2T}}{S_n h_K} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) +$$

$$+ \sum_{i=1}^n \frac{b_n \left( I_y^2 R_{y0} \frac{\rho_H}{\rho_0} + \frac{1}{2} K_M P_\tau S_p h n_1 \right)}{\lambda_n S_n} + \theta_0, \quad (5)$$

где  $\theta_{PO}$  – температура в камере ЭМС;  $T$  – период процесса обработки до достижения установившегося температурного режима;

$t$  – продолжительность обработки;

$S_n$  – площадь наружной поверхности камер ЭМС;

$h_K$  – коэффициент теплоотдачи ( $h_K = 16-20$  Вт/м<sup>2</sup>);

$\lambda_n, S_n, b_n$  – коэффициент теплопроводности материала, площадь поверхности и толщина  $n$ -го участка ЭМС.

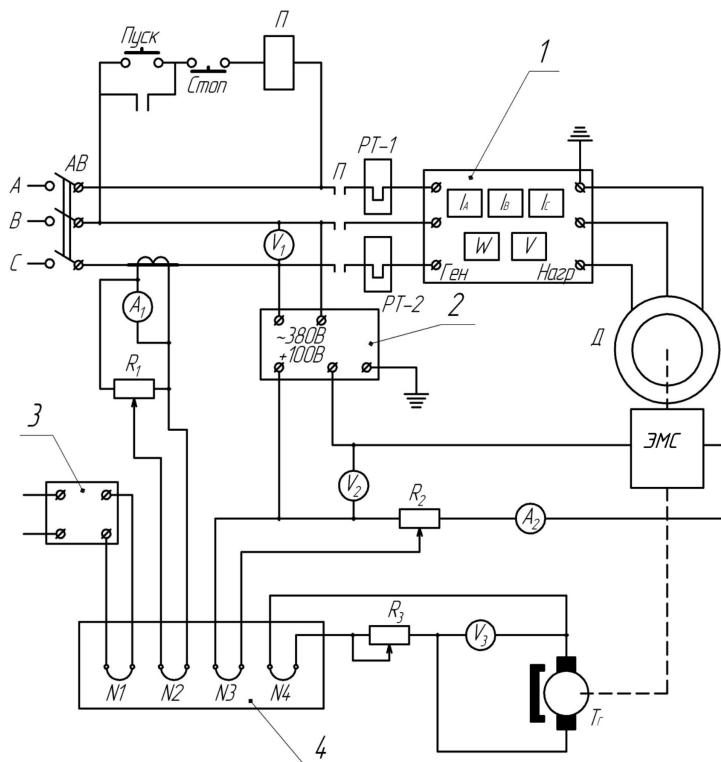


Рис. 4. Экспериментальная установка

Исследования проведены в режиме работы ЭМС-1, при котором достигается заданная технологией однородность смеси: индукция электромагнитного поля в рабочей камере  $B = 0,3$  Тл, скорость вращения ротора  $n_1 = 23,5$  с<sup>-1</sup>. Номинальные режимы работы при обработке смеси в ЭМС-2: индукция электромагнитного поля в рабочей камере  $B = 0,4$  Тл, скорость вращения ротора  $n_1 = 24,2$  с<sup>-1</sup>. В ЭМС-1 установившееся тепловое состояние достигается при температуре  $\theta_{m1} = 44$  °С ( $T_1 = 37$  мин). В ЭМС-2 – при  $\theta_{m1} = 38$  °С ( $T_2 = 28$  мин). Погрешность: 2,4% при  $t = 3$ Т, 1,9% при  $t = 4$ Т, 0,6% при  $t = 5$ Т.

Адекватность математических моделей реальным процессам подтверждена многочисленными экспериментами на ЭМС различных конструктивных модификаций.

### Заключение

Установлено, что температура рецептурной смеси шоколадной массы в установленном тепловом режиме работы смесителей ЭМС-1 и ЭМС-2 не превышает допустимых значений и отвечает технологическим требованиям. Адекватность математических моделей реальным процессам подтверждена многочисленными экспериментами на ЭМС различных конструктивных модификаций.

### Список литературы

1. Дмитричева Р.Р., Бронская В.В., Мануйко Г.В., Аминова А.А., Гимальгинов А.Г., Халимбаев Р.Р. Расчет полей скоростей и давления в аппарате с лопастной мешалкой // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 21. С. 124–126.
2. Омельченко Д.П., Уваров И.П. Энергосбережение и пути оптимизации использования электрической энергии // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/article/view?id=15936> (дата обращения: 20.05.2020).
3. Вершинин И.Н., Вершинин Н.П. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем. Сальск – Москва: Переломные технологии XXI века, 2007. 368 с.
4. Мищенко М.В., Боков М.М., Гришаев М.Е. Активация технологических процессов обработки материалов в аппаратах с вращающимся электромагнитным полем // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–16. С. 3508–3512.
5. Беззубцева М.М., Ружьев В.А., Дзюба А.М. Исследование процесса перемешивания сыпучих материалов в электромагнитных мешалках // Успехи современного естествознания. 2014. № 11–3. С. 116–117.
6. Беззубцева М.М. К вопросу интенсификации процесса перемешивания продукта в аппаратах с магнитоожженным слоем ферротел // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 8–3. С. 135–136.
7. Bezzubtseva M.M., Volkov V.S. Regularities of formation of shock-abrasive loads in magnetic liquefied layer of electromagnetic mechanoactivation. European Journal of Natural History. 2017. № 4. P. 79–82.
8. Зубченко А.В., Копенкина И.Н., Аверьянова Т.Е. Новые способы получения шоколадных масс // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. 2012. № 4. С. 33–35.
9. Клешко Г.М., Горячева Г.Н., Антипова Ю.В., Рысева Л.И., Кондакова И.А. Совершенствование технологии шоколадного производства с целью рационального использования какао продуктов // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. 2006. № 10. С. 1–28.