

## К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНОАКТИВАТОРОВ С МАГНИТООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

Беззубцева М.М.

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

В статье представлены результаты исследования тепловых режимов работы аппаратов с магнитоожигенным слоем – электромагнитных механоактиваторов. Показано, что процесс механоактивации материалов протекает в заданном направлении при определенной, установленной технологией диспергирования температуре, которая достигается путем регулирования отвода теплоты от устройства в окружающую среду или охлаждающему агенту (при тяжелых тепловых режимах работы). Расчет тепловых режимов работы аппаратов предложено проводить по известным в практике машиностроения методикам с учетом трактовки физических процессов, происходящих в магнитоожигенном слое ЭММА при организации измельчающего усилия, а также особенностей конструктивного исполнения аппаратов. Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил правомерность теории, положенной в основу создания диспергирующих усилий в магнитоожигенном слое ферротел-размольных элементов электромагнитных механоактиваторов.

**Ключевые слова:** электромагнитные механоактиваторы, тепловые режимы, методика расчета

## TO THE QUESTION OF THE RESEARCH OF THERMAL OPERATING MODES OF ELECTROMAGNETIC MECHANOACTIVATORS WITH THE MAGNETOFLUIDISED LAYER

Bezzubceva M.M.

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

The article presents the results of investigation of thermal modes of operation of the apparatus with magnetic liquefied layer of electromagnetic mechanoactivation. It is shown that the process of mechanical activation of materials occurs in a given direction at a certain established technology dispersion temperature, which is achieved by regulating the removal of heat from the device to ambient or cooling agent (in severe thermal conditions). Calculation of thermal modes of operation of the apparatus proposed according to the known in the practice of engineering methods, taking into account the interpretation of the physical processes in magnetic liquefied layer of the EMMA in the organization of grinding effort as well as features of the design of the apparatus. Analysis of experimental results confirmed the validity of the theory that underlies the creation of the dispersing efforts in Ferrotel magnetic liquefied layer of grinding elements of electromagnetic mechanoactivation.

**Keywords:** mechanoactivated electromagnetic, thermal regimes, method of calculation

Электромагнитные механоактиваторы (ЭММА) представляют перспективный тип оборудования с магнитоожигенным слоем для проведения процессов гомогенного перемешивания жидких и твердых веществ, тонкого и сверхтонкого измельчения и диспергирования-механоактивации порошковых материалов в различных отраслях промышленности. Их отличает высокая производительность, надежность работы, улучшенное качество продуктов помола, малая мощность, затраченная на управление процессом механоактивации материалов. Все эти качества позволяют предполагать дальнейшее успешное внедрение аппаратов типа ЭММА в современные промышленные линии производства. Процесс измельчения продукта протекает в заданном направлении при определенной, установленной технологией диспергирования температуре, которая достигается путем регулирования отвода теплоты от устройства в окружающую сре-

ду или охлаждающему агенту (при тяжелых тепловых режимах работы). Трактовка физических процессов, происходящих в магнитоожигенном слое ЭММА при организации измельчающего усилия, позволяет точно определить место концентрации тепловых потерь [1, 2, 3, 4]. Эти потери концентрируются в слое разрыва структурных построений из раздольных элементов и выделяются в виде теплоты, обуславливая нагрев наполнителя рабочего объема и соприкасающихся с ним элементов устройства. Если небольшие устройства можно выполнить с соблюдением естественного теплового баланса притока и отвода теплоты, то в ЭММА большой мощности отвод суммарных тепловых потерь через сравнительно небольшую наружную поверхность может привести к нарушению теплового баланса и превышению температуры нагрева отдельных частей устройства выше допустимых значений [5, 6]. Нарушение теплового режи-

ма работы ЭММА обуславливает ухудшение качественных показателей обрабатываемого продукта и эксплуатационных свойств аппарата. Так, перегрев обмотки управления повышает ее сопротивление, снижая ток возбуждения, а, следовательно, и величину силовых взаимодействий в магнитоожигенном слое ферротел (между размольными органами устройства). Для одного и того же заполнителя рабочего объема (по свойствам и количеству) и при одной и той же величине скорости скольжения могут иметь место различные значения удельного измельчающего усилия в зависимости от установленного в ЭММА температурного режима [7]. В этой связи при проектировании конструктивных форм аппаратов необходимо проводить тепловой расчет, с определением максимально установившейся температуры в рабочем объеме и температуры нагрева обмотки управления [8].

Целью исследования является анализ работы аппаратов с магнитоожигенным слоем ферротел – электромагнитных механоактиваторов (ЭММА).

#### Материал и методы исследований

Эффективность работы электромагнитных механоактиваторов с обеспечением технологии диспергирования путем создания в рабочих объемах заданных тепловых режимов работы. Применены теоретические и экспериментальные методы исследований.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Расчет тепловых режимов работы аппаратов проведен по известным в практике машиностроения методикам, исходя из следующих особенностей их конструктивного исполнения и положенного в основу способа организации измельчающего усилия [9, 10, 11]:

1. Согласно конструктивной реализации способа, тепловой поток направлен по радиусу к наружному цилиндру устройства, так как на пути его движения к боковым крышкам с целью герметизации рабочего объема устанавливаются прокладки значительной величины, обладающие малой теплопроводностью. Кроме того, в конструкции ЭММА предусматривается, что площадь наружной цилиндрической поверхности значительно превосходит площадь боковых крышек. Поэтому можно считать, что тепловой поток потерь энергии при скольжении направлен от внутренних элементов устройств типа ЭММА к их наружным поверхностям.

2. Температурный режим в ЭММА обусловлен электромагнитным и скоростным режимами его работы и способами отвода

тепловых потерь. Поэтому при расчете необходимо учитывать, что основными источниками теплоты, нагревающими рабочий объем и все устройство в целом, являются потери мощности в слое разрыва структурных построений Р2Т и потери РУТ, затраченные на питание обмоток управления. При этом потери мощности РУТ определяются током  $I_y$  в обмотке:

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

где  $\rho_H$  и  $\rho_0$  - удельные сопротивления обмотки управления в нагретом состоянии и при температуре окружающей среды;

$R_{y0}$  - сопротивление обмотки при температуре окружающей среды.

Мощность потерь, выделяющихся в рабочем объеме ЭММА в виде теплоты, согласно физической трактовке способа зависит от величины передаваемого к «слою скольжения» момента  $M_C$  и скорости его вращения  $n_1$

$$P_{2T} = K_M M_C n_1, \quad (2)$$

где  $K_M$  - коэффициент, учитывающий технологические и масштабные характеристики процесса и деформационное поведение рабочих органов аппарата ( $K_M < 1$ ).

Мощность  $P_{2T}$  можно представить в виде:

$$P_{2T} = \frac{1}{2} K_M P_\tau S_p h_0 n_1, \quad (3)$$

где  $P_\tau$  - тангенциальная составляющая силового взаимодействия между ферротелом

и в их магнитоожигенном слое;  $S_p$  - средняя площадь «слоя скольжения» из ферротел.

$$P_T = I_y^2 R_{y0} \frac{\rho_H}{\rho_0} + \frac{1}{2} K_M P_\tau S_p h_0 n_1. \quad (4)$$

Для обеспечения протекания технологического процесса измельчения продукта в заданном направлении, т.е. при определенной температуре продукта  $\theta_{np}$  в рабочем объеме ЭММА, суммарные тепловые потери должны быть частично или полностью отведены за счет теплоотдачи от наружной поверхности устройства к воздуху или охлаждающему агенту.

Последовательность теплового расчета устройств, реализующих электромагнит-

ный способ создания измельчающего усилия, сводится к определению суммарных тепловых потерь, установлению величины теплового потока и температурного перепада в отдельных частях ЭММА с учетом их конструкции и геометрических размеров, установлению температуры нагрева корпуса, расчету и построению кривой нагрева и определению температуры в рабочем объеме и в обмотках управления, сравнительному анализу этих температур с допустимыми значениями, предусмотренными технологией переработки продукта и эксплуатационными характеристиками аппарата.

Разработка алгоритмов расчета стационарных тепловых полей в ЭММА, построенных на основании традиционных в практике методов теплового расчета, с учетом вышеизложенных положений и особенностей конструктивной реализации способа, представлена в работах [12, 13]. Сравнительная оценка результатов, полученных при использовании алгоритмов и экспериментальных данных, производилась на стенде, принципиальная электрическая схема которого приведена на рисунке 1. Одновременно проверялась работоспособность и устанавливались эксплуатационные характеристики конструктивных модификаций ЭММА при различных режимных параметрах их работы (электромагнитных, скоростных, тепловых).

Измерение тока, потребляемого электродвигателем Д, фазного напряжения и мощности осуществлялась измерительным комплексом типа К-51, ток управления ЭММА и питающее напряжение – астатическими амперметром и вольтметром, скорость смещения рабочих поверхностей контролировалась тахогенератором постоянного тока с постоянными магнитами ТГЦ-3Б.

Экспериментальное определение теплового поля в ЭММА проводилось с помощью медь-константановых термопар с использованием токосъемника с вращающимися щетками и подвижными кольцами, дающими суммарную погрешность вместе с погрешностью схемы компенсации термо-э.д.с. промежуточных спаев, не превосходящую 0,7...1,0 °С.

В связи с тем, что теплопроводность наполнителя рабочего объема зависит от свойств и количества как ферромагнитной компоненты (размольных элементов), так и немагнитной его составляющей (обрабатываемого продукта), то определение этого параметра производилось экспериментальным путем. Метод определения коэффициента теплопроводности наполнителя в специально разработанном кондуктометре с охранным кольцом [8].

В процессе экспериментальных исследований снималась характеристика  $\theta = \varphi(t)$ , по которой определялась максимально установившаяся температура  $\theta_m$  корпуса и постоянная времени нагревания  $T$  исследуемых устройств. При определении значений  $T$  использовалось основное свойство экспоненты, согласно которому для произвольной точки подкасательная по линии  $\theta = \theta_m$  для постоянной времени.

Характер изменения температуры при нагреве ЭММА для измельчения, например, полуфабрикатов шоколадного производства, конструктивные схемы и технические характеристики которых приведены в работах [15, 16], представлен на рисунке 2. Для номинального режима работы ЭММА-1 [16] ( $B=0,37$  Тл,  $n_1=23,5$  с<sup>-1</sup>) установившееся тепловое состояние достигается при температуре  $\theta_{m1} = 48^\circ\text{C}$  через время  $T_1=60$  мин. Соответствующие значения для ЭММА-2 в режиме работы ( $B=0,3$  Тл,  $n_1=22$  с<sup>-1</sup>) составляют:  $\theta_{m2} = 46^\circ\text{C}$ ,  $T_2=50$  мин. Погрешность, характеризующая разницей между установившимся и текущим значениями превышения температуры, составляет приблизительно 4% при  $t=3T$ , 1,8% при  $t=4T$ , 0,7% при  $t=5T$ .

При этом установлено, что температура продукта  $\theta_{\text{пр}}$  на выходе из устройств при их работе в номинальных режимах и установившемся тепловом состоянии не превышает допустимых значений, соответствующих технологическим требованиям диспергирования полуфабрикатов шоколадного производства и составляет: для ЭММА-1  $\theta_{\text{пр}}=65^\circ\text{C}$ , для ЭММА-2  $\theta_{\text{пр}}=61^\circ\text{C}$ .

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных, проведенный для всего комплекса исследований температурных режимов работы ЭММА различных конструктивных модификаций [17], показал, что положенные в основу теплового расчета формулы:

$$\theta = \theta_m \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + \theta_0 \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right] \quad (5)$$

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

$$\theta_{po} = \frac{P_{yT} + P_{2T}}{S_n h_K} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{b_n \left( I_y^2 R_{y0} \frac{\rho_H}{\rho_0} + \frac{1}{2} K_M P_\tau S_p h n_1 \right)}{\lambda_n S_n} + \theta_0, \quad (6)$$

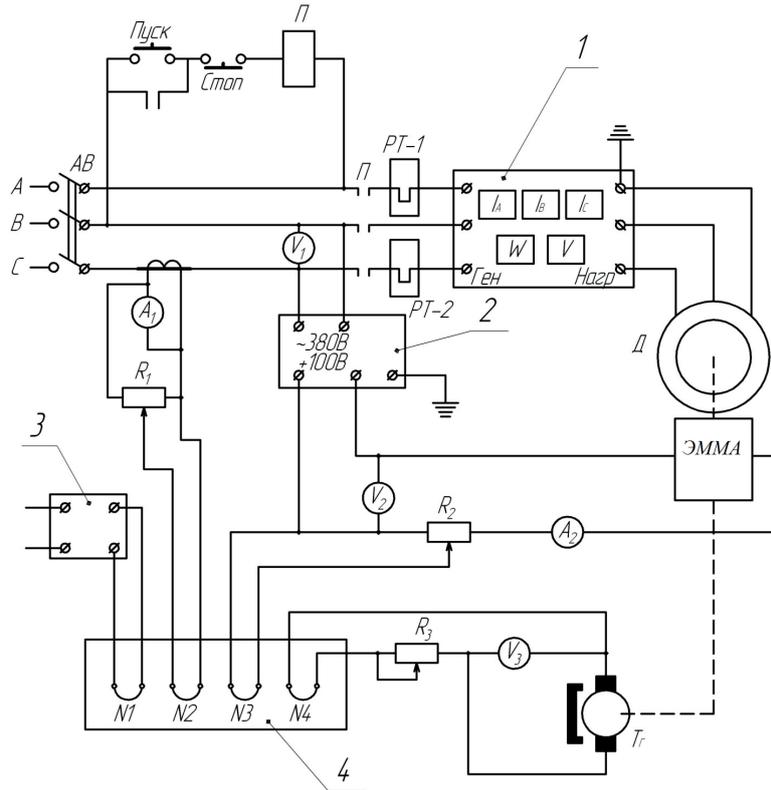


Рис.1.Электрическая схема испытательного стенда ЭММА

где  $\theta_{ПО}$  - температура в рабочем объеме измельчителей;  $S_n$  и  $hK$  - соответственно площадь наружной поверхности корпуса измельчителя и его коэффициент теплоотдачи ( $hK = 16...20$  Вт/м<sup>2</sup>) [210, 322];  $\lambda n$ ,  $S_n$ ,  $bn$ -соответственно коэффициент теплопроводности материала, площадь поверхности и толщина n-го участка) дают максимальную относительную ошибку не более 14 % для рабочих интервалов температуры 25...110°C, что не превышает предела точности проводимых измерений такого рода.

ЭММА большой мощности нуждаются в форсированном охлаждении циркуляцией охлаждающего агента при помощи встроенного или имеющего независимый привод вентиляторов. Для тяжелых тепловых режимов работы ЭММА целесообразно использовать систему принудительного охлаждения [6].

### Заключение

В результате комплексных исследований аппаратов ЭММА и процессов диспергирования установлено, что средняя мощность выделяющихся тепловых потерь соответствует теплоте, которую может рассеять наружная поверхность корпуса. Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил правомерность теории,

положенной в основу создания диспергирующих усилий в магнитооживленном слое ферротел - размольных элементов электромагнитных механоактиваторов.

### Список литературы

1. Беззубцева М.М., Криштопа В.А. Исследование тепловых процессов в электромагнитном измельчителе постоянного тока. В сборнике: Технологии и средства механизации сельского хозяйства сборник научных трудов. Редакционная коллегия: Л. В. Тишкин - главный редактор, Б. И. Вагин, Е. И. Давидсон, В. В. Калюга. Санкт-Петербург, 2006. С. 19-26.
2. 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;
3. Беззубцева М.М., Обухов К.Н. К вопросу исследования физико-механических процессов в магнитооживленном слое ферротел // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 7-2. – С. 191-195
4. Беззубцева М.М., Воронов М.С. К вопросу исследования контактных взаимодействий в аппаратах с магнитооживленным слоем // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 9. – С. 83-85.
5. Беззубцева М.М., Бороденков М.Н. Анализ направлений повышения энергоэффективности размольного оборудования // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 9. – С. 85-86.
6. Беззубцева М.М., Волков В.С. Метод расчета электромагнитного механоактиватора с системой принудительного охлаждения. В сборнике: Глобализация и развитие агропромышленного комплекса России сборник научных трудов международной научно-практической конференции,

посвященной 110-летию Санкт-Петербургскому государственному аграрному университету. Министерство сельского хозяйства РФ, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, главный редактор В. А. Ефимов. 2014. С. 76-78.

7. Беззубцева М.М., Ружьев В.А., Загаевски Н.Н. Формирование диспергирующих нагрузок в магнитоожигенном слое электромагнитных механоактиваторов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 10. – С. 78-80.

8. Беззубцева М.М., Мазин Д.А., Зубков В.В. Исследование тепловых характеристик аппаратов с магнитоожигенным слоем // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2011. № 24. С. 311-315.

9. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н. Рекомендации по расчету тепловых режимов аппаратов, реализующих способ формирования силового взаимодействия в магнитоожигенном слое ферротел // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8-4. – С. 116-116.

10. Беззубцева М.М. Энергоэффективный способ электромагнитной активации // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 5. – С. 92-93.

11. Беззубцева М.М. К вопросу обеспечения тепловых режимов работы электромагнитных механоактиваторов // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 5-3. – С. 357-358.

12. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н. Экспериментальные исследования теплового поля в аппаратах

с магнитоожигенным слоем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 3-1. – С. 138-139.

13. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н. Исследование тепловых режимов электромагнитных механоактиваторов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 6. – С. 108-109

14. Обухов К.Н., Беззубцева М.М. Исследование тепловых режимов электромагнитных измельчителей и повышение их эксплуатационных свойств с помощью иктермографии // Вестник Студенческого научного общества. 2014. № 3. С. 10-12.

15. Беззубцева М.М. К вопросу научного обоснования внедрения импортозамещающего способа электромагнитной механоактивации в аппаратурно-технологические системы АПК. В сборнике: Научное обеспечение развития аПК в условиях импортозамещения Сборник научных трудов международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. 2016. С. 339-343.

16. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н. Научное обоснование внедрения импортозамещающего способа электромагнитной механоактивации в аппаратурно-технологические системы шоколадного производства: монография, 2016. – СПб.: СПбГАУ. – 197 с.

17. Беззубцева М.М., Волков В.С. Механоактиваторы агропромышленного комплекса. Анализ, инновации, изобретения: монография. - СПб.: СПбГАУ, 2014. - 161 с.