

УДК 663.915

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ И МОМЕНТОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СИСТЕМУ ФЕРРОМАГНИТНЫХ РАЗМОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ В МАГНИТООЖИЖЕННОМ СЛОЕ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНОАКТИВАТОРОВ

Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н., Котов А.В.

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

Статья посвящена разработке физико-математической модели рабочего процесса формирования диспергирующих усилий в магнитоожигенном слое ферромагнитных размольных элементов цилиндрической формы, расположенном в рабочем объеме электромагнитных механоактиваторов в смеси с перерабатываемым высоковязким и пластичным материалом различного целевого назначения. В физико-математическую модель рабочего процесса формирования диспергирующего усилия включены результаты решения задачи определения деформированного магнитного поля в объеме обработки материала, а также задачи определения сил и моментов, действующих на систему элементов магнитоожигенного слоя со стороны поля, создаваемого постоянным по знаку и регулируемым по величине электрическим током, пропускаемым по обмоткам управления электромагнитных механоактиваторов. Проанализировано строение деформированных силовых линий магнитного поля рабочего объема ЭММА при внесении в него системы размольных элементов цилиндрической формы, определена потенциальная энергия взаимодействия k -го токового слоя с суммарным магнитным полем остальных $k - 1$ стержней и невозмущенного поля. Представлены формулы для определения сил и моментов, действующих на структурную группу из ферроэлементов при различных углах их деформаций в процессе работы ЭММА. Проанализированы стадии формирования и разрушения структурных групп из ферроэлементов в рабочем процессе создания диспергирующих нагрузок.

Ключевые слова: магнитоожигенный слой, диспергирующее усилие, деформированное магнитное поле, размольные элементы цилиндрической формы

DEFINITION OF FORCES AND MOMENTS ACTING ON THE SYSTEM OF FERROMAGNETIC GRINDING ELEMENTS WITH CYLINDRICAL SHAPE IN MAGNETIC LIQUEFIED LAYER OF WORKING VOLUME OF ELECTROMAGNETIC MECHANICAL ACTIVATORS

Bezzubtseva M.M., Volkov V.S., Obukhov K.N., Kotov A.V.

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

This article devoted to creating the physics and mathematics model of working process at formation dispersing forces in magnetic liquefied layer of ferromagnetic grinding elements with cylindrical shape located in working volume of electromagnet mechanical activators, in the mix with processed high viscosity and plastic material having different purpose. The physics and mathematics model of working process at formation dispersing forces contains the results of the solution of problem connected with definition of forces and moments acting on the system of elements of magnetic liquefied layer from the field which was created by the electric current with constant sign and ability to be adjustable by value, which was transmitted in the windings of direction of mechanical activators. In the work there were analysed the structure of deformed lines of force of magnetic field of working volume EMMA at entering into it the system grinding elements with cylindrical shape, there was defined the potential energy of interaction of k -current layer with total magnetic field of others $k - 1$ rods of unperturbed field. There were represented formulas of definition of forces and moments acting on structure group of ferro-elements with different angles of their deformation at EMMA's working. There were analysed the staged of formation and destruction of structure groups of ferro-elements at working process connected with formation of dispersing load.

Keywords: magnetic liquefied layer, dispersing force, strain magnetic field, grinding elements with cylindrical shape

При переработке высоковязких и пластичных материалов в электромагнитных механоактиваторах (ЭММА) [1, 2, 3, 4, 5] и смесителях [6, 7] наиболее предпочтительной является цилиндрическая форма ферромагнитных размольных тел [1, 3, 8]. Система намагниченных стержней, представляющих магнитоожигенный слой рабочего объема ЭММА, испытывает силовое и энергетическое воздействие со стороны деформированного магнитного поля [9, 10]. В актах энергонапряженных и регу-

лируемых силовых контактов размольные тела целенаправленно передают энергию частицам перерабатываемого продукта, измельчая его статическим сжатием и ударом [10, 11, 12, 13]. Физико-математическая модель рабочего процесса формирования диспергирующего усилия [10, 14] включает результаты решения двух задач: определение деформированного магнитного поля и определение сил и моментов, действующих на стержень со стороны поля. Деформированное магнитное поле в рабочем объеме

ЭММА описано системой интегральных уравнений с вырожденными ядрами [9]. В результате решения системы найдены неизвестные плотности простых слоев $\sigma_i(\varphi)$, $i = 1, \dots, n$ и определен потенциал $A_z(P)$ для любой точки P плоскости, перпендикулярной осям стержней [9]. В статье представлены результаты решения второй задачи физико-математической модели рабочего процесса формирования диспергирующего усилия – задачи определения сил и моментов, действующих на стержень со стороны деформированного магнитного поля в рабочем объеме ЭММА.

Целью данной работы является решение задачи определения сил и моментов, действующих со стороны деформированного магнитного поля на систему размоленных ферротел цилиндрической формы в рабочем объеме ЭММА.

Материал и методы исследований

Предметом исследований является рабочий процесс формирования силовых контактов в магнитоожигненном слое ферротел ЭММА.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате решения первой задачи физико-математической модели формирования диспергирующего усилия в слое ферромагнитных размоленных элементов (РЭ) определено деформированное магнитное поле и найдены неизвестные плотности простых слоев $\sigma_i(\varphi)$, $i = 1, \dots, n$ [9]. Таким образом, определен потенциал $A_z(P)$ для любой точки

P плоскости, перпендикулярной осям РЭ. Потенциальная энергия взаимодействия k -го токового слоя с суммарным магнитным полем остальных $k - 1$ РЭ и невозмущенного поля определена формулой

$$W_k = \int_0^{2\pi} \sigma_k(\varphi) \tilde{A}_z(P) d\varphi. \quad (1)$$

Условные обозначения и иллюстративный материал к решению первой и второй задач аналогичны и приведены в работе [9]. Точка P принадлежит контуру сечения k -го РЭ. Потенциал $A_z(P)$ зависит только от обобщенных координат системы РЭ. Система из n РЭ, оси которых параллельны, определяется $3n$ обобщенными координатами. Такими обобщенными координатами могут служить, например, полярные координаты остальных $(n - 1)$ РЭ относительно центра сечения k -го РЭ, как полюса и угла поворота каждого РЭ относительно собственной оси. Очевидно, что ввиду симметрии РЭ их поворот не влияет на магнитное поле. Поэтому потенциальная энергия поля не будет зависеть от этих углов. Следовательно, будут равны нулю моменты сил поворота РЭ относительно их осей. Рассмотрим выражение

$$\ln \frac{1}{R_{Kj}} = -\ln C_{Kj} - \ln \tilde{R}_{Kj}.$$

Разложим функцию $\ln \tilde{R}_{Kj}$ в ряд по степеням E_{Kj} :

$$\begin{aligned} \ln \tilde{R}_{Kj} = & 2E_{Kj} \left[(\alpha_{Kj} - \varphi_j) - \cos(\alpha_{Kj} - \varphi_K) \right] + \\ & + \frac{E_{Kj}^2}{2} \left[4 \cos(2\alpha_{Kj} - \varphi_j - \varphi_K) - 2 \cos(\alpha_{Kj} - \varphi_j) - 2 \cos(\alpha_{Kj} - \varphi_K) + \right. \\ & \left. + 4 \cos(\varphi_j - \varphi_K) - 4 \sin \frac{\varphi_j - \varphi_K}{2} - 4 \right] + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Интерес для рассматриваемой задачи представляют только третий, шестой и седьмой члены справа

в формуле (2) [9]. Поэтому искомые аппроксимированные ядра имеют следующий вид:

$$K_{Kj}^* = -\frac{1}{C_{Kj}^2} \left[\cos(2\alpha_{Kj} - \varphi_K - \varphi_j) + \cos(\varphi_j - \varphi_K) - \sin \frac{\varphi_j - \varphi_K}{2} \right]. \quad (3)$$

Таким образом, искомая потенциальная энергия взаимодействия k -го РЭ с внешним

магнитным полем может быть представлена выражением

$$W_k = \frac{1}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ (i \neq K)}}^n \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} K_{Ki}^* \sigma_K(\varphi_K) \sigma_i(\varphi_i) d\varphi_K d\varphi_i - \int_0^{2\pi} \cos \varphi_K \sigma_K(\varphi_K) d\varphi_K. \quad (4)$$

Силы и моменты, действующие на k -й РЭ со стороны внешнего для него магнитного поля, определены равенствами

$$\left. \begin{aligned} F_{Ki} &= \frac{dW_K}{dC_{Ki}}, \\ M_{Ki} &= \frac{dW_K}{d\alpha_{Ki}}, \quad i \neq k. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Распределение деформированных силовых линий магнитного поля при внесении в него однородного размоляющего элемента цилиндрической формы представлено на рис. 1, а. В этом случае из системы получаем

$$\begin{aligned} \sigma_1(\varphi) + \frac{1}{\pi C_{1,2}^2} \int_0^{2\pi} \sigma_2(\psi) \cos(2\alpha_{1,2} - \varphi - \psi) d\psi + 2\chi \cos \psi &= 0; \\ \sigma_2(\varphi) + \frac{1}{\pi C_{2,1}^2} \int_0^{2\pi} \sigma_1(\psi) \cos(2\alpha_{2,1} - \varphi - \psi) d\psi + 2\chi \cos \psi &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку $C_{1,2} = C_{2,1}$ и $\alpha_{1,2} = \alpha_{2,1} + \pi$, то $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ и оба уравнения сводятся к одному

$$\sigma(\varphi) + \frac{1}{\pi C_{1,2}^2} \int_0^{2\pi} \sigma(\psi) \cos(2\alpha_{1,2} - \varphi - \psi) d\psi + 2\chi \cos \psi = 0. \quad (8)$$

Решение интегрального уравнения имеет вид

$$\sigma(\varphi) = \frac{8C_{1,2}^2 \chi}{16C_{1,2}^4 - \chi^2} \left[\chi \cos(2\alpha_{1,2} - \varphi) - 4C_{1,2}^2 \cos \varphi \right]. \quad (9)$$

Картина эквипотенциальных линий (силовых линий) магнитного поля двух РЭ при $C_{1,2} = 2$ и $\alpha_{1,2} = 0, \pi/4, \pi/2$ приведена на рис. 1, б, в, г. Потенциальная энергия взаимодействия первого РЭ с полем совпадает

с потенциальной энергией взаимодействия второго РЭ с полем. Вычисленная с точностью до $\frac{1}{C_{1,2}^2}$, эта энергия имеет вид

$$W_K = W_{K1} = W_{K2} \approx -\frac{\chi\pi}{C_{1,2}^2} (5\chi \cos 2\alpha_{1,2} - 4). \quad (10)$$

Потенциальная энергия в этом случае зависит только от двух обобщенных координат $C_{1,2}$ и $\alpha_{1,2}$. Момент сил M_K , приложенных к системе, определен соотношением

$$M_K = \frac{dW_K}{d\alpha_{1,2}} = \frac{5\pi\chi^2}{C_{1,2}^2} \sin 2\alpha_{1,2}. \quad (11)$$

Поэтому если угол $0 < \alpha_{1,2} < \pi/2$, то возникает момент, который стремится увеличить этот угол, т.е. повернуть РЭ так, чтобы линия, соединяющая центры их сечений, расположилась параллельно силовым линиям невозмущенного поля.

Сила, действующая на первый РЭ, приложена к центру его сечения и направлена вдоль линии, соединяющей их центры сечений

$$\sigma(\phi) = -2 \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \cos \phi. \quad (6)$$

Потенциальная энергия сил взаимодействия РЭ с магнитным полем постоянна и не зависит от положения РЭ ($W_K = \text{const}$). Поэтому главный вектор сил и главный вектор моментов, приложенных к одиночному РЭ в плоском магнитном поле, равны нулю. Этот вывод является очевидным, так как картина деформации магнитного поля симметрична относительно оси РЭ. При контактном взаимодействии двух РЭ цилиндрической формы в рабочем объеме ЭММА система интегральных уравнений имеет вид

$$F = \frac{dW_K}{dC_{1,2}} \approx \frac{\chi\pi}{C_{1,2}^3} (5\chi \cos 2\alpha_{1,2} - 4). \quad (12)$$

При $\alpha_{1,2} = 0$, т.е. когда прямая линия, соединяющая центры сечений РЭ, перпендикулярна силовым линиям невозмущенного поля, имеем

$$F = \frac{\chi\pi}{C_{1,2}^3} (5\chi - 4), \quad (13)$$

т.е. при достаточно большой магнитной проницаемости РЭ ($\mu \gg 1$) сила взаимодействия $F > 0$. Таким образом, в этом случае РЭ отталкиваются. При $\alpha_{1,2} = \pi/2$ имеем

$$F = -\frac{\chi\pi}{C_{1,2}^3} (5\chi + 4). \quad (14)$$

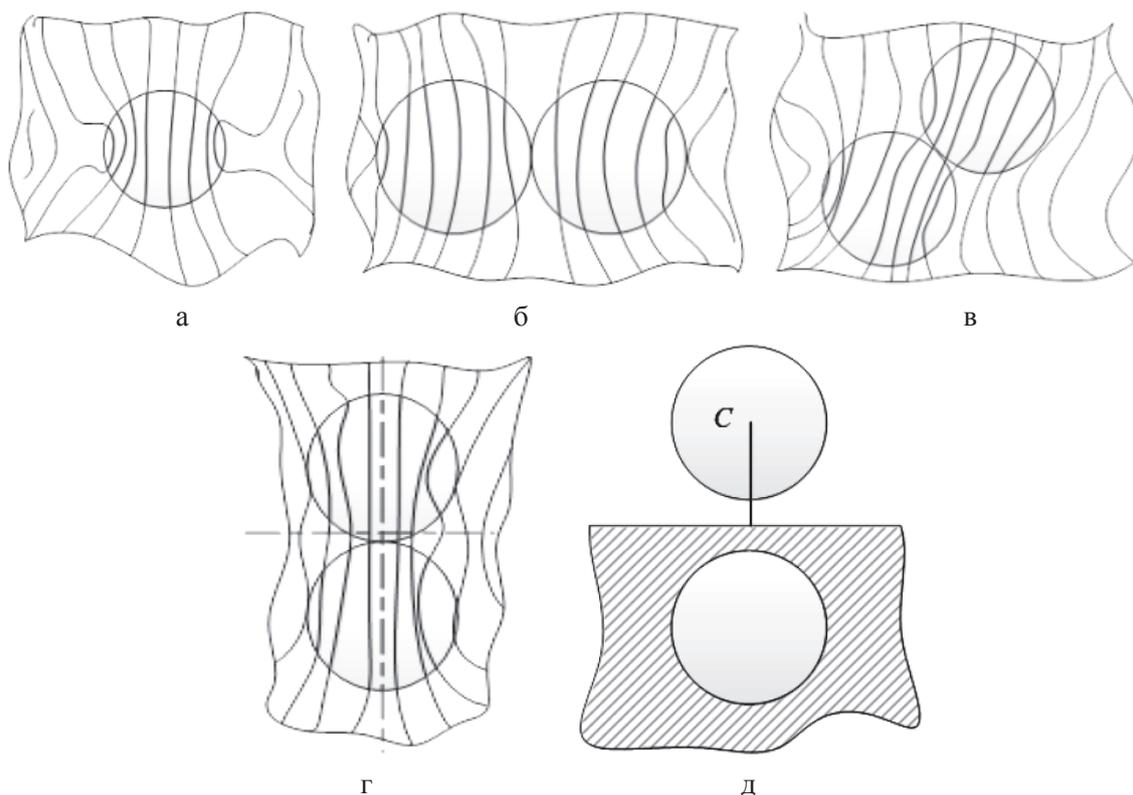


Рис. 1. К расчету силового взаимодействия между размоными элементами цилиндрической формы: а – ферромагнитный РЭ в магнитном поле рабочего объема; б – взаимодействие РЭ при $C_{1,2} = 2$ и $\alpha_{1,2} = 0$; в – взаимодействие ферромагнитных РЭ при $C_{1,2} = 2$ и $\alpha_{1,2} = \pi$; г – взаимодействие ферромагнитных РЭ при $C_{1,2} = 2$ и $\alpha_{1,2} = \pi/2$; д – РЭ в магнитном поле около проводящей стенки

В этом случае F всегда отрицательна, т.е. РЭ притягиваются друг к другу.

Рассмотрим поведение одного РЭ в плоском магнитном поле около проводящей стенки (рис. 1, д). Этот случай легко сводится к предыдущему (если добавить второй РЭ, симметричный первому относительно стенки). При этом всегда существует сила притяжения РЭ к стенке рабочей камеры ЭММА, которая определяется по формуле

$$F = -\frac{8\chi\pi}{C^3}(5\chi + 4), \quad (15)$$

где C – расстояние от центра сечения РЭ до стенки рабочей камеры ЭММА.

Картина эквипотенциальных линий магнитного поля трех ферромагнитных РЭ, помещенных в рабочий объем ЭММА, в случае, когда $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi/4$, приведена на рис. 2, а, б. Аналогичное распределение линий получено при n -м количестве РЭ.

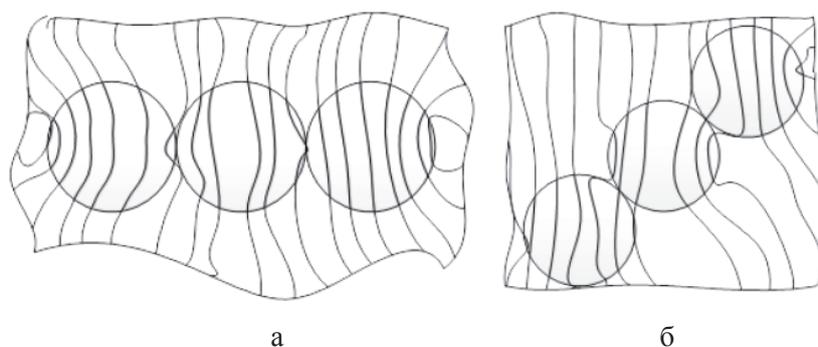


Рис. 2. Распределение эквипотенциальных линий магнитного поля в рабочем объеме ЭММА: а – структурная группа из РЭ в рабочем объеме ЭММА при $\alpha_{1,2,3} = 0$; б – структурная группа из РЭ в рабочем объеме ЭММА при $\alpha_{1,2,3} = \pi/4$

Заключение

В результате исследований определена величина сил и моментов, действующих на ферромагнитные размоляные элементы со стороны деформированного магнитного поля в рабочем объеме ЭММА при различных коэффициентах его объемного заполнения ферромагнитной составляющей. На основании анализа физико-математической модели проведено обоснование рабочего процесса формирования диспергирующего усилия в магнитоожигенном слое ферротел ЭММА.

Список литературы

1. Беззубцева М.М., Волков В.С. Механоактиваторы агропромышленного комплекса. Анализ, инновации, изобретения // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 5–1. – С. 182.
2. Беззубцева М.М. Энергоэффективный способ электромагнитной активации // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 5. С. 92–93.
3. Беззубцева М.М., Платашенков И.С., Волков В.С. Классификация электромагнитных измельчителей для пищевого сельскохозяйственного сырья // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2008. – № 10. – С. 150–153.
4. Беззубцева М.М., Ковалев М.Э. Электротехнологии переработки и хранения сельскохозяйственной продукции // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 6. – С. 50–51.
5. Беззубцева М.М., Волков В.С., Платашенков И.С. Интенсификация технологических процессов переработки сельскохозяйственной продукции с использованием электромагнитных активаторов постоянного тока // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2008. – № 9. – С. 190–192.
6. Беззубцева М.М., Волков В.С. Электромагнитные мешалки. Теория и технологические возможности. – Saarbrücken: PalmariumAcademicPublishing, 2013. – 133 с.
7. Беззубцева М.М. К вопросу интенсификации процесса перемешивания продукта в аппаратах с магнитоожигенным слоем ферротел // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 8 (часть 3). – С. 135–136.
8. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н. Конструктивная модернизация аппаратов с магнитоожигенным слоем с целью повышения энергоэффективности // Современные наукоемкие технологии, 2014. – № 6. – С. 68–69.
9. Беззубцева М.М., Ружьев В.А., Волков В.С. Теоретические исследования деформированного магнитного поля в рабочем объеме электромагнитных механоактиваторов с магнитоожигенным слоем размоляных элементов цилиндрической формы // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6–4. – С. 689–693.
10. Bezzubceva M. M., Ruzhyev V.A., Yuldashev R. Z. Electromagnetic mechanoactivation of dry construction mixes. International Journal of Applied And Fundamental Research. – 2013. – № 2 – URL: www.science-sd.com/455-24165 (16.11.2013)
11. Беззубцева М.М., Волков В.С. Обеспечение условий управления процессом измельчения продуктов в электромагнитных механоактиваторах (ЭММА) // Международный

журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2012. – № 7. – С. 93–94.

12. Беззубцева М.М., Мазин Д.А., Зубков В.В. Исследование коэффициента объемного заполнения ферромагнитной составляющей в аппаратах с магнитоожигенным слоем // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2011. – № 23. – С. 371–376.

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

References

1. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Mehanoaktivatory agropromyshlennogo kompleksa. Analiz, innovacii, izobreteniya, Uspehi sovremennogo estestvoznaniya, 2014, no. 5–1. pp. 182.
2. Bezzubceva M.M., Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija, 2012, no. 5, pp. 92–93.
3. Bezzubceva M.M., Platashenkov I.S., Volkov V.S., Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2008. no. 10. pp 150–153.
4. Bezzubceva M.M., Kovalev M.Je., Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij, 2012, no. 6., pp. 50–51.
5. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Platashenkov I.S., Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2008, no. 9, pp. 190–192.
6. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Jelektromagnitnye meshalki. Teorija i tehnologicheskie vozmozhnosti. Saarbrucken: PalmariumAcademicPublishing, 2013. 133 p.
7. Bezzubceva M.M. Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija, 2014, no. 8 (chast' 3), pp. 135–136.
8. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Obuhov K.N. Sovremennye naukoemkie tehnologii, 2014. no. 6. pp. 68–69.
9. Bezzubceva M.M., Ruzh'ev V.A., Volkov V.S., Fundamental'nye issledovanija, 2014, no. 6–4, pp 689–693.
10. Bezzubceva M. M., Ruzhyev V.A., Yuldashev R.Z. Electromagnetic mechanoactivation of dry construction mixes. International Journal of Applied And Fundamental Research. 2013. no. 2 URL: www.science-sd.com/455-24165 (16.11.2013)
11. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij, 2012, no. 7, pp. 93–94.
12. Bezzubceva M.M., Mazin D.A., Zubkov V.V., Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2011, no. 23, pp. 371–376.
13. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija, 2012, no. 12–1, pp. 116.

Рецензенты:

Ракутько С.А., д.т.н., заведующий лабораторией энергоэффективных электро-технологий ГНУ СЗ НИИМЭСХ, г. Санкт-Петербург;

Новоселов А.Г., д.т.н., профессор кафедры «Процессы и аппараты пищевых производств» Института холода и биотехнологий, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 10.10.2014.