

УДК: 519.711.3

DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0009

## ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЯМЫХ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РАБОТЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

© 2021

**Карпухин Эдуард Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и физика»

**Дементьева Елена Сергеевна**, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Математика и физика»

*Пензенский государственный технологический университет*

*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, 1А/11, e-mail: edvar1@rambler.ru)*

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы математического моделирования прямых магнитострикционных эффектов, которые лежат в основе функционирования магнитострикционных преобразователей перемещения (МПП). Исследования таких явлений для разных частных случаев проведены в работах многих авторов, но общая методика их моделирования применительно к МПП на настоящее время отсутствует. Поэтому целью статьи является попытка сделать обобщение известных моделей прямых магнитострикционных эффектов МПП и на его основе сформировать общую методику их моделирования. Для этого проводится подробный обзор известных математических моделей магнитострикционных явлений, учитывающих все возможные факторы влияния, имеющие место в подобных устройствах. Главным образом затрагиваются модели, описывающие явление магнитострикции с точки зрения термодинамических соотношений плотности свободной энергии и их применение для исследования работы МПП. Отмечаются особенности таких моделей и наиболее важные замечания для их практического использования. Проведенный анализ позволяет предложить обобщенную методику математического моделирования магнитострикционных эффектов при работе МПП путем введения объединяющего функционала, принимающего значения конкретных параметров, существенно влияющих на моделирование конкретного устройства, с возможностью расширения его функциональных возможностей.

**Ключевые слова:** магнитострикционные преобразователи перемещений, математическое моделирование, математические модели прямых магнитострикционных эффектов, особенности моделирования МПП, обобщенная методика моделирования МПП.

## GENERALIZED METHOD OF MATHEMATICAL SIMULATION OF DIRECT MAGNETOSTRICTIONAL PHENOMENA DURING OPERATION OF MAGNETOSTRICTIONAL DISPLACEMENT CONVERTERS

© 2021

**Karpukhin Eduard Vladimirovich**, candidate of technical sciences,

associate professor sub-department of «Mathematics and physics»

**Dementyeva Elena Sergeevna**, candidate of pedagogical sciences,

associate professor sub-department of «Mathematics and physics»

*Penza State Technological University*

*(440039 Russia, Penza, pr. Baidukova / ul. Gagarina, 1a / 11, e-mail: edvar1@rambler.ru)*

**Abstract.** The paper discusses mathematical modeling of direct magnetostrictive effects, which underlie the functioning of magnetostrictive displacement converters (MFP). Studies of such phenomena for various private cases have been carried out in the works of many authors, but there is currently no general methodology for their modeling in relation to WFP. Therefore, the purpose of the article is to attempt to generalize the known models of direct magnetostrictive effects of WFP and on its basis to form a general methodology for their modeling. To do this, a detailed review of known mathematical models of magnetostrictive phenomena is carried out, taking into account all possible influences that occur in such devices. Models describing the phenomenon of magnetostriction in terms of thermodynamic ratios of free energy density and their use for the study of the work of WFP are mainly affected. The features of such models and the most important comments for their practical use are noted. The analysis allows to propose a generalized method of mathematical modeling of magnetostrictive effects in the operation of WFP by introducing a combining functionality that takes the values of specific parameters that significantly affect the modeling of a particular device, with the possibility of expanding its functional capabilities.

**Keywords:** magnetostrictive displacement transducers, mathematical modeling, mathematical models of direct magnetostrictive effects, WFP modeling features, a generalized WFP modeling technique.

**Введение.** Центральное место при работе магнитострикционных преобразователей перемещения (МПП) занимают прямые магнитострикционные эффекты. Явление магнитострикции (изменение размеров ферромагнетиков при воздействии на них магнитным полем) впервые описано в работах Джоуля. Им

был установлен только сам факт такого изменения, а более детальные его описания появились позже в работах других исследователей [1-8]. Среди них можно выделить следующие наиболее значащие эффекты.

1. Эффект Видемана. Частный случай линейной магнитострикции, заключающийся в закручивании

магнитострикционного стержня, находящегося во внешнем продольном магнитном поле, при пропускании через него импульсов тока. В следствие эффекта Видемана, очевидно, в среде стержня формируются крутильные УЗВ.

2. Эффект Виллари. Обратный эффект линейной магнитострикции, состоящий в изменении намагниченности магнитострикционного стержня при изменении его линейных размеров.

3. Эффект Маттеучи. Является обратным к эффекту Виллари и состоит в возникновении намагниченности закрученного магнитострикционного стержня, находящегося в аксиальном магнитном поле.

**Целью** статьи является проведение обзора известных математических моделей магнитострикционных эффектов, их анализ и обобщение, а также предложение на их основе нового общего подхода к моделированию МПП.

**Материалы и результаты исследования.** Физические основы магнитострикции можно выразить известным термодинамическим соотношением [9]:

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial H}\right)_\sigma = \left(\frac{\partial M}{\partial \sigma}\right)_H, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – обратимая магнитострикционная деформация,  $M$  – намагниченность,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $\sigma$  – механическое напряжение (индексы  $\sigma, H$  и др. здесь и в дальнейшем означают постоянство указанной величины при вычислении производной).

В работе [1] математическая модель магнитострикции приводится на основе плотности свободной энергии в виде:

$$F = U(S, \varepsilon, B) - TS = F(T, \varepsilon, B), \quad (2)$$

где  $F, U$  – свободная и внутренняя энергии,  $S$  – энтропия,  $T$  – температура,  $\varepsilon$  – деформация, представленная в виде тензора,  $B$  – магнитная индукция.

Переписав (2) для приращений энергий, можно получить систему:

$$\begin{cases} dU = TdS + \sigma d\varepsilon + HdB, \\ dF = -SdT + \sigma d\varepsilon + HdB. \end{cases} \quad (3)$$

Преобразования (3) приводят к следующим равенствам:

$$\sigma = \left(\frac{\partial F}{\partial \varepsilon}\right)_M; H = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial F}{\partial M}\right)_\varepsilon; \left(\frac{\partial \sigma}{\partial M}\right)_\varepsilon = \mu_0 \left(\frac{\partial H}{\partial \varepsilon}\right)_M = \frac{\partial^2 F}{\partial \varepsilon \partial M} = -h, \quad (4)$$

где  $h$  – магнитострикционная постоянная, а также предполагается, что процесс проходит изотермически, и выбор одной из величин  $(\varepsilon, M, \sigma, H)$  в качестве константы определяет характер граничных условий и задает параметры рассматриваемой системы [1].

Представив свободную энергию  $F$  в виде степенного ряда, и подставив его в (4), получим:

$$\begin{cases} \sigma' = c^M \varepsilon' + Q M' M^0, \\ H' = \left(\gamma^\varepsilon + \frac{1}{\mu_0} Q \varepsilon^0\right) M' + \frac{1}{\mu_0} Q M^0 \varepsilon', \end{cases} \quad (5)$$

где  $c^M, \gamma^\varepsilon$  – тензоры квазистатических модулей упругости и магнитной восприимчивости соответственно,  $Q$  – коэффициент, определяющий изменение магнитных свойства.

Для одномерного случая (которым чаще всего ограничивается применение магнитострикционных явлений в МПП), выбрав в качестве независимых пе-

ременных  $(\varepsilon, M)$ , система (5) может быть записана в виде:

$$\begin{cases} \sigma' = E^M \varepsilon' - h M', \\ H' = -\frac{1}{\mu_0} h \varepsilon' + (\kappa^\varepsilon)^{-1} M', \end{cases} \quad (6)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\kappa$  – обратная восприимчивость.

Выбирая другие независимые переменные, можно получить еще три аналогичные системы:

$$\begin{cases} \varepsilon' = (E^H)^{-1} \sigma' + d H', \\ M' = \frac{1}{\mu_0} d \sigma' + \kappa^\sigma H', \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sigma' = E^H \varepsilon' - e H', \\ M' = \frac{1}{\mu_0} e \varepsilon' + \kappa^\varepsilon H', \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \varepsilon' = (E^M)^{-1} \sigma' + g M', \\ H' = -\frac{1}{\mu_0} g \sigma' + (\kappa^\sigma)^{-1} M'. \end{cases} \quad (9)$$

Параметры систем (6) – (9) связаны с помощью магнитострикционных постоянных выражениями:

$$\begin{aligned} d &= \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial H}\right)_\sigma \approx \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial \sigma}\right)_H; e = -\left(\frac{\partial \sigma}{\partial H}\right)_\varepsilon \approx \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial \varepsilon}\right)_H; \\ g &= \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial H}\right)_\sigma \approx -\mu_0 \left(\frac{\partial H}{\partial \sigma}\right)_M; h = -\left(\frac{\partial \sigma}{\partial H}\right)_\varepsilon \approx -\mu_0 \left(\frac{\partial H}{\partial \varepsilon}\right)_M. \end{aligned} \quad (10)$$

Как известно [10], модели, полученные на основе (5) не учитывают все аспекты магнитомеханического преобразования при закручивании МЗП, и для их уточнения можно ввести в рассмотрение процесс перехода магнитной энергии в механическую. Для этого термодинамический потенциал следует рассмотреть в виде:

$$dF = -SdT + \tau dy + HdB + hdb, \quad (11)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение,  $y$  – угол сдвига.

В работе [1] из выражения (11) получены следующие равенства:

$$\tau = \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_{Bb}; H = \left(\frac{\partial F}{\partial B}\right)_{yb}; h = \left(\frac{\partial F}{\partial b}\right)_{yb}; \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \tau}{\partial B \partial b}\right)_y = \left(\frac{\partial^2 H}{\partial y \partial b}\right)_B = \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y \partial B}\right)_b = \frac{\partial^3 F}{\partial y \partial B \partial b} = -q,$$

Которые в дальнейшем, путем разложения в степенной ряд функции  $F$ , преобразуются в систему уравнений:

$$\begin{cases} \tau = G^{Bb} y - q B b, \\ H = B(\mu_a^{yb})^{-1} - q y b, \\ h = b(\mu_a^{yB})^{-1} - q y B, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость,  $G$  – модуль сдвига,  $q$  – магнитострикционная постоянная.

Выбирая в качестве независимых различные переменные из набора  $\{\tau, y, H, h, B, b\}$ , на основе (13) можно получить системы, аналогичные системам (6) – (9). Далее, сопоставляя (6) – (9) и (13), вводят коэффициент магнитомеханической связи  $k$ , показывающий эффективность преобразования магнитной энергии  $F_M$  в механическую  $F_e$ , как отношение:

$$k^2 = \frac{F_M}{F_E} = \frac{\kappa^\varepsilon h^2}{\mu_0 E^M}. \quad (14)$$

На основе (14) можно установить соотношения между магнитными и механическими величинами в (5) и (13) в виде:

$$\frac{E^H}{E^M} = \frac{\kappa^\varepsilon}{\kappa^\sigma} \approx \frac{E^H}{E^B} \approx \frac{G^H}{G^B} \approx \frac{\mu^\varepsilon}{\mu^\sigma} = 1 - k^2. \quad (15)$$

С помощью равенства (15) возможно выразить любую постоянную величину из уравнений (6) – (9).

Таким образом, модель (1) – (14) подходит для полного описания явления линейной магнитострикции с термодинамической точки зрения в одномерном случае. Для этого необходимо задать модуль Юнга  $E$ , магнитную проницаемость  $\mu$  и коэффициент магнито-механической связи (14).

Другой подход к математическому описанию явления магнитострикции изложен в работе [5], где отмечается, что изменение размеров ферромагнетика происходит вследствие наличия не только внешних механических напряжений, но внутренних напряжений  $\sigma_r$  и зависит от начальной магнитной восприимчивости  $\chi_{r,0}$ , которая может быть найдена по формуле:

$$\chi_H = \frac{2J_s^2}{9\varepsilon_s \sigma}, \quad (16)$$

где  $J_s$  – намагниченность насыщения,  $\varepsilon_s$  – относительная магнитострикционная деформация при  $J=J_s$ .

При магнитострикционном преобразовании происходит также изменение модуля упругости МЗП на величину  $\Delta E$  (дельта  $E$ -эффект), которое выражается через  $\sigma_r$  и  $\chi_{r,0}$  следующим образом:

$$\frac{E_s - E_0}{E_0} = \frac{2\varepsilon_s E_s}{5\sigma} = \frac{9E_s \varepsilon_s^2 \chi_H}{5J_s}. \quad (17)$$

где  $E_0, E_s$  – модули Юнга без намагниченности и при намагниченности насыщения соответственно.

В работе [5], также на основе этого подхода и модели (16), (17) рассматривается зависимость магнитоупругой чувствительности  $\Lambda$ , как функции от магнитной индукции МЗП  $B$ :

$$\Lambda(B) = 2,25 \frac{\varepsilon_s B}{K} \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2}\right), \quad (18)$$

где  $B_s$  – индукция насыщения,  $K$  – постоянная анизотропии.

Таким образом, модель (16) – (18) отличается простотой и достаточно точно описывает магнитострикционные явления в изотропных железо-никелевых сплавах.

В контексте рассматриваемой проблемы, помимо исследования самого явления магнитострикции, важно описать вызываемые им процессы формирования УЗВ в среде МЗП, а также сигналы выходного ЭАП, возникающие при их считывании. Рассмотрим известные математические модели этих процессов.

В работе [4] показана связь между параметрами катушки возбуждения входного ЭАП и выходными сигналами ПМПП. Получены следующие квадратурные формулы для механической деформации  $v(t)$  и выходной э.д.с.  $e(t)$ , наводимой на обмотке выходного ЭАП:

$$v(t) = K_1 \int_0^{\tau_1} \phi(t - \tau) d\tau, \quad (19)$$

$$e(t) = K_2 \frac{d}{dt} \int_0^{\tau_2} v(t - \tau) d\tau, \quad (20)$$

где  $K_1, K_2$  – регулирующие коэффициенты,  $\phi$  – магнитный поток через катушку входного ЭАП,  $\tau_1, \tau_2$  – длительности импульсов возбуждения и считывания.

Другая модель основана на системе уравнений [4]:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial F}{\partial x}, \\ H = \frac{1}{\mu_r} B - 4\pi \lambda_M \frac{\partial u}{\partial x}, \\ F = \frac{\partial u}{\partial x} - \lambda_M B, \end{cases} \quad (21)$$

где  $\rho$  – плотность МЗП,  $F$  – приложенная к нему сила,  $x$  – текущая координата,  $u$  – перемещение,  $\mu_r$  – магнитная проницаемость,  $\lambda_M$  – магнитострикционная постоянная.

Решение системы (21) позволяет определить механические напряжения и э.д.с. на выходе ЭАП в виде:

$$\sigma(k, x, t) = \frac{\lambda_M \mu_r}{2E} \int_0^1 H(\varepsilon) e^{jk(\varepsilon - x - V\tau)} d\varepsilon, \quad (22)$$

$$e(k, t) = -\frac{4\pi \mu_r \lambda_M^2}{2E} H_0 \omega k W_2 \left[ \int_0^1 f(\varepsilon) e^{jk\varepsilon} d\varepsilon \right]^2 e^{jk(l_x - V\tau)}, \quad (23)$$

где  $V$  – скорость звука,  $k$  – волновое число,  $H(\varepsilon)$  – правило распределения поля в МЗП,  $f(x) = H(x)/H_0$ ,  $H_0$  – напряженность магнитного поля в центре обмотки ЭАП считывания,  $l_x$  – расстояние между обмотками ЭАП,  $W_2$  – число витков в обмотке ЭАП считывания.

С помощью выражений (22), (23) можно вывести формулу коэффициента передачи ПМПП  $G$  [4]:

$$G = \frac{e(k, t)}{u_{zx}(k, t)} = -j \frac{4\pi \mu_r \lambda_M^2 k W_2}{2E W_1} \cdot \frac{\left[ \int_0^1 f(\varepsilon) e^{jk\varepsilon} d\varepsilon \right]^2}{\int_0^1 f^2(\varepsilon) d\varepsilon} e^{jk l_x}, \quad (24)$$

где  $W_1$  – число витков в обмотке ЭАП возбуждения.

Модели (19), (20) и (21)–(24) являются упрощенными и не учитывают влияние многих факторов, оказывающих существенное влияние на работу МПП, например затухание волн, дисперсии, поверхностного и краевого эффектов и др.

В работе [11] модели ПМПП рассматриваются как система уравнений магнитного поля и магнитострикционных явлений в виде:

$$\begin{cases} \sigma + L_n = \rho_M U_n, \\ GE + B = 0, \\ GE - D = I_i, \end{cases} \quad (25)$$

где  $\rho_M$  – плотность МЗП,  $L_n$  – сила Лоренца,  $G$  – оператор Леви-Чивита,  $I_i$  – координаты вектора плотности токов проводимости.

Уравнения (25) могут быть объединены в систему с уравнениями аналогичными (5), вида:

$$\begin{cases} \sigma = C\varepsilon - m'HH', \\ B = mH\varepsilon + \mu H_m, \end{cases} \quad (26)$$

где  $C$  – матрица упругости,  $\varepsilon$  – магнитострикционные постоянные,  $\mu$  – магнитные проницаемости с обобщенным законом Ома:



$$\begin{cases} I = \rho_{31} U + r(E + GU'B), \\ D = \epsilon E, \end{cases} \quad (27)$$

где  $\rho_{31}$  – плотность электрических зарядов,  $r, \epsilon$  – тензоры электрической проводимости и диэлектрической проницаемости соответственно.

Из системы (25) – (27) может быть получено уравнение результирующего магнитного поля ПМПП:

$$H(P, t) = H_P^0(P) + H_P^1(P, t)e^{-j\omega t} + h_p(P, t), \quad (28)$$

Недостатком модели (25) – (28) является необходимость экспериментально определять многие ее параметры.

В работе [12] модель ПМПП представлена в полиномиальном виде:

$$y = b_0 + \sum b_{y_i} x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2, \quad (29)$$

где  $b$  – коэффициенты уравнения регрессии,  $x$  – влияющие факторы.

Коэффициенты  $b$  рассчитываются в соответствии с методом наименьших квадратов по известной формуле:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (30)$$

Модель (29), (30) хорошо описывает многие ПМПП с помощью аппроксимации их экспериментальных данных, но не подходит для исследования новых устройств, для которых такая информация отсутствует.

Такой подход позволил дополнить модель некоторыми рекомендациями, такими как [4]:

1. Условие проверки эффективности диаметра МЗМ. Допустимое напряжение должно удовлетворять условию:

$$P \leq \frac{1}{k_2} \sigma \frac{\pi D^2}{4}, \quad (31)$$

где  $\sigma$  – предельный коэффициент упругости,  $D$  – диаметр МЗП.

2. Учет провисания МЗП. Необходимо наличие начального механического напряжения величиной

$$H_0 = \sqrt{\left(\frac{wL}{8F}\right)^2 + \left(\frac{wL}{2}\right)^2}, \quad (32)$$

где  $w$  – удельный вес МЗП.

3. Контроль исходного механического напряжения (п.2) может осуществляться с помощью равенства:

$$H_2^2 + \left[ \frac{ESW^2L^2}{24H_1^2} + ES\alpha(\theta_2 - \theta_1) - H_1 \right] H_2 - \frac{ESW^2L^2}{24} = 0, \quad (33)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $S$  – площадь поперечного сечения МЗП,  $\alpha$  – температурный коэффициент,  $H_1, H_2$  – начальное и конечное натяжение МЗП.

**Заключение.** Обобщая известные математические модели магнитоэлектрических явлений МПЭ, можно предложить методику их моделирования, путем построения функционала  $L\{f_i\}$ , где  $f_i$  – математические модели магнитоэлектрических явлений рассмотренных видов, учитывающие ряд необходимых параметров конкретной задачи. Подобный подход, при проведении исследований был применен, например, в работах [13–20].

Значениями функционала  $L$  являются параметры магнитоэлектрического эффекта МПЭ, которые могут быть использованы для исследования как известных, так и новых магнитоэлектрических устройств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кадров А.В. Магнитоупругие явления в ферромагнитных материалах при деформациях кручения: Дис....канд. техн. наук. – Екатеринбург, 1995. – 146 с.
2. Надеев М.А. Моделирование и оценка характеристик и показателей магнитоэлектрических преобразователей: Дис....канд. техн. наук. – Астрахань, 2007. – 187 с.
3. Петрищев О.Н. Волновые поля в ультразвуковых магнитоэлектрических трактах: Дис....канд. физ.-мат. наук. – Киев, 1984. – 189 с.
4. Ясоев В.Х. Магнитоэлектрические волноводные преобразователи параметров движения: Дис....докт. техн. наук. – Уфа, 2001. – 425 с.
5. Бозорт Р. Ферромагнетизм. – М.: ИЛ, 1956. – 740 с.
6. Карпукhin Э.В. Математическое моделирование магнитных полей накладных магнитоэлектрических уровнемеров: Монография/ Э.В. Карпукhin, С.Б. Демин. – Пенза: ПензГТУ, 2014. – 116 с.
7. Демин С.Б. Магнитоэлектрические системы для автоматизации технологического оборудования: Монография. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2002. – 182 с.
8. Прошкин В.Н. Конструкторско-технологические способы совершенствования магнитоэлектрических преобразователей линейных перемещений для специальных условий эксплуатации: Дис....канд. техн. наук. – Астрахань, 2007. – 229 с.
9. Карпукhin Э.В. Математическое моделирование магнитных полей накладных магнитоэлектрических уровнемеров: Дис....канд. техн. наук. – Пенза, 2012. – 157 с.
10. Малюгин Д. В. Магнитоупругое взаимодействие в магнитоэлектрических металлах при деформациях сдвига: Автореферат дис....канд. физ.-мат. наук. – Ижевск, 1992 – 19 с.
11. Петрищев О.Н., Шпинь А.П. Ультразвуковые магнитоэлектрические волноводные системы. – Киев: Изд-во при Киевском университете, 1989. – 132 с.
12. Надеев А.И. Интеллектуальные магнитоэлектрические преобразователи параметров движения сверхбольшого диапазона: Дис....докт. техн. наук. – Астрахань, 2000. – 365 с.
13. Баженов Ю.М. Сверхтяжелый бетон для защиты от радиации/ Ю.М. Баженов, А.П. Прошин, А.И. Еремкин, Е.В. Королев, А.Н. Бормотов// Строительные материалы. – 2005. – № 8. – С. 6-9.
14. Бормотов А.Н. Имитационное моделирование деформации и метод прогнозирования стойкости композиционных материалов\*/ А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, Е.В. Королев// Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 4. – С. 113-118.
15. Прошин А.П. Методологические принципы выбора оптимальных наполнителей композиционных материалов/ А.П. Прошин, А.М. Данилов, Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.Н. Бормотов// Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004. – № 10 (550). – С. 15-20.
16. Бормотов А.Н. Методика представления композиционного материала как объекта исследования и моделирования/ А.Н. Бормотов, Е.А. Колобова, Ю.В. Конопацкий// Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3. – С. 44-51.
17. Королев Е.В. Глеттлицериновые строительные материалы для защиты от радиации/ Е.В. Королев, А.Н. Бормотов, А.С. Иноземцев, С.С. Иноземцев// Строительные материалы. – 2009. – № 12. – С. 69-71.
18. Бормотов А.Н. Методологические принципы математического моделирования и синтеза композиционных материалов из отходов нефтепереработки/ А.Н. Бормотов, М.В. Кузнецова, Е.А. Колобова// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (38). – С. 85-94.
19. Коновалова И.И. Алгоритм настройки адаптивных регуляторов/ И.И. Коновалова, С.В. Селезнёва, А.Н. Коновалов, А.Н. Бормотов// В мире научных открытий. – 2013. – № 6 (42). – С. 22-33.
20. Бормотов А.Н. Система управления качеством при математическом моделировании и многокритериальном синтезе наномодифицированных композитов специального назначения/ А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, М.В. Кузнецова// Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2014. – Т. 64. № 2. – С. 110-118.

Статья поступила в редакцию 27.04.2021

Статья принята к публикации 16.06.2021