IPCMF 21

XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ ПЛЕССКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НАНОДИСПЕРСНЫМ МАГНИТНЫМ ЖИДКОСТЯМ

сентябрь, 2024
Иваново, Россия

Сборник
научных трудов

Организована
Ивановским государственным энергетическим университетом имени В.И. Ленина (ИГЭУ)
Совместно
с Министерством науки и высшего образования РФ
Академией электротехнических наук РФ

XXI всероссийская с международным участием Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям организована Министерством науки и высшего образования РФ, ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Академией электротехнических наук РФ.

В сборнике научных трудов конференции рассмотрены вопросы физикохимии магнитных коллоидных систем, физических свойств и гидродинамики, тепло- и массообмена, применения магнитных жидкостей в медицине, биологии, экологии и технике. В него включены доклады об исследованиях, которые представляют научный, учебный и практически-методический интерес.

Сборник научных трудов подготовлен в рамках базовой части задания Министерства образования и науки РФ.

Под общей редакцией
доктора технических наук, профессора Ю.Б. Казакова

По материалам XXI всероссийской с международным участием Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям будет выпущен электронный сборник научных трудов, который будет размещен в научной электронной библиотеке на eLIBRARY.RU договор № 1042-03/2015К

ISBN 978-5-00062-621-4

© ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2024

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СФЕРИЧЕСКИХ АНИЗОТРОПНЫХ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ТЕЛ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Меркулов Д.И. [1], **Пелевина Д.А., Турков В.А., Налетова В.А.**
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»,
Российская Федерация, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: merkulovdima@mail.ru[1]

Аннотация. В работе рассмотрено взаимодействие двух анизотропных намагничивающихся сферических тел во внешнем однородном магнитном поле. Аналитически получена и исследована сила, действующая на одно из этих тел со стороны неоднородного магнитного поля, индуцированного вторым телом. Данная сила представлена как сила взаимодействия двух диполей с магнитными моментами специального вида. Вычислены соответствующие магнитные моменты. Выполнены расчеты значений сил при различных параметрах задачи, в частности, направлениях векторов анизотропии и магнитного поля.

Ключевые слова: анизотропный намагничивающийся эластомер, сила диполь-дипольного взаимодействия, однородное магнитное поле

НАЛЕТОВА Вера Арсеньевна, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник НИИ механики МГУ. Имеет более 180 научных статей. Научно-исследовательская работа неоднократно поощрялась грантами РНФ и РФФИ.

ПЕЛЕВИНА Дарья Андреевна, к.ф.-м.н, доцент кафедры гидромеханики механико-математического факультета МГУ. Имеет 66 научных публикаций, в том числе 38 статей в журналах. Научно-исследовательская работа поддерживалась грантами РНФ, РФФИ и Президента РФ.

ТУРКОВ Владимир Андреевич, к.ф.-м.н, доцент, ведущий научный сотрудник НИИ Механики МГУ. Имеет более 100 научных статей. Научно-исследовательская работа неоднократно поощрялась грантами РНФ и РФФИ.

Введение. Исследованию намагничивающихся эластомеров (НЭ), то есть дисперсных сред, состоящих из упругой полимерной матрицы (силикон) и распределенных в ее объеме ферромагнитных микро- или наночастиц, посвящено значительное количество научных работ. Например, в статьях [1] и [2] теоретически и экспериментально, соответственно, изучены деформации тонких тел из НЭ в неоднородном магнитном поле. Если при изготовлении НЭ феррочастицы выстроятся

в цепочки или ориентируются осями легкого намагничивания вдоль некоторого направления, то такой материал приобретет анизотропные свойства. Магнитные свойства анизотропных намагничивающихся эластомеров (АНЭ) экспериментально исследованы в работах [3, 4]. В работе [4] была получена формула для силы, действующей на тело из АНЭ в неоднородном магнитном поле. На основании данной формулы в работах [5, 6] исследовано движение сферического тела из АНЭ в неоднородном магнитном поле.

С использованием сферических тел из АНЭ можно изготовить мобильные роботы, аналогичные рассмотренным в статье [7]. При этом единичные векторы анизотропии $\boldsymbol{\tau}_1, \boldsymbol{\tau}_2$ ($\boldsymbol{\tau}_i = \cos\varphi_i \boldsymbol{e}_x + \sin\varphi_i \boldsymbol{e}_z$), направленные вдоль цепочек частиц либо осей легкого намагничивания, могут быть ориентированы различным образом. Один из возможных вариантов такого мобильного робота схематически представлен на рис. 1.

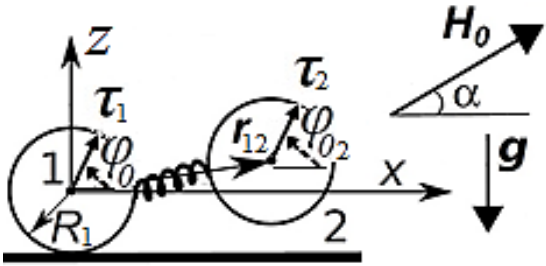

Рис. 1. Вариант мобильного робота с телами из АНЭ

Для теоретического исследования мобильного робота из АНЭ необходимо вычислить силу, с которой взаимодействуют анизотропные сферические тела. Движение тел, содержащих элементы из АНЭ, под действием поля постоянного магнита экспериментально исследовано в [8].

В предлагаемой работе рассмотрено взаимодействие двух анизотропных намагничивающихся сферических тел во внешнем однородном магнитном поле. Аналитически получена и исследована сила, действующая на одно из этих тел со стороны неоднородного магнитного поля, индуцированного вторым телом. Данная сила представлена как сила взаимодействия двух диполей с магнитными моментами специального вида. Вычислены соответствующие магнитные моменты. Выполнены расчеты значений сил при различных параметрах задачи, в частности, направлениях векторов анизотропии.

Теория. Введем магнитную проницаемость АНЭ, а также дополнительные параметры магнитных свойств тела и среды ($\mu^{(e)}$ – магнитная

проницаемость среды; $\mu^{(i)} > 0$, $a > 0$ – постоянные, определяемые в эксперименте [3]):

$$\mu_{ij} = \mu^{(i)} g_{ij} + a\tau_i\tau_j, a_1 = \frac{\mu^{(e)} - \mu^{(i)} - a}{2\mu^{(e)} + \mu^{(i)} + a}, a_2 = \frac{\mu^{(e)} - \mu^{(i)}}{2\mu^{(e)} + \mu^{(i)}}. \quad (1)$$

Формула, полученная в работе [4], была переписана для силы, действующей на первое сферическое тело из АНЭ в неоднородном магнитном поле $\boldsymbol{H_2}$, индуцированном вторым телом ($k_\mu = (a_1\text{-}a_2)(\boldsymbol{H_2\tau_1})^2/ H_2^2 + a_2$; R_1, R_2 – радиусы тел):

$$\boldsymbol{F}_{m1} = -\mu^{(e)} R_1^3 (k_\mu \nabla H_2^2 / 2 - (a_2 - a_1)(\boldsymbol{H}_2\boldsymbol{\tau}_1)(\nabla_i H_{2j})\tau_{1\perp}^j e^i). \quad (2)$$

Выполнив преобразования, формулу (2) можно свести к силе диполь-дипольного взаимодействия с магнитными моментами $\boldsymbol{m}_1, \boldsymbol{m}_2$ специального вида ($\boldsymbol{r}_{21} = -\boldsymbol{r}_{12}$, см. рис. 1):

$$\boldsymbol{F}_{m1} = -\mu^{(e)} \left(m_{1i} \frac{\partial H_{2i}}{\partial x} \boldsymbol{e}_x + m_{1i} \frac{\partial H_{2i}}{\partial z} \boldsymbol{e}_z \right) \quad (3)$$

$$\boldsymbol{H}_2 = \boldsymbol{H}_0 + \frac{\boldsymbol{m}_2}{r_{21}^3} - \frac{3(\boldsymbol{m}_2\boldsymbol{r}_{21})\boldsymbol{r}_{21}}{r_{21}^5}; \quad (4)$$

$$\boldsymbol{H}_1 = \boldsymbol{H}_0 + \frac{\boldsymbol{m}_1}{r_{12}^3} - \frac{3(\boldsymbol{m}_1\boldsymbol{r}_{12})\boldsymbol{r}_{12}}{r_{12}^5};$$

$$\boldsymbol{m}_1 = R_1^3 (a_2 \boldsymbol{H}_2 - (a_2 - a_1)(\boldsymbol{H}_2\boldsymbol{\tau}_1)\boldsymbol{\tau}_1);$$

$$\boldsymbol{m}_2 = R_2^3 (a_2 \boldsymbol{H}_1 - (a_2 - a_1)(\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{\tau}_2)\boldsymbol{\tau}_2). \quad (5)$$

Решив систему (3)-(5), можно получить в точности формулу для силы диполь-дипольного взаимодействия [9]:

$$\boldsymbol{F}_{m1} = -\mu^{(e)} \left(\boldsymbol{r}_{12} \left(\frac{3(\boldsymbol{m}_1\boldsymbol{m}_2)}{r_{12}^5} - \frac{15(\boldsymbol{m}_1\boldsymbol{r}_{12})(\boldsymbol{m}_2\boldsymbol{r}_{12})}{r_{12}^7} \right) + \frac{3(\boldsymbol{m}_1\boldsymbol{r}_{12})\boldsymbol{m}_2}{r_{12}^5} + \frac{3(\boldsymbol{m}_2\boldsymbol{r}_{12})\boldsymbol{m}_1}{r_{12}^5} \right). \quad (6)$$

Таким образом, показано, что сила (2), с которой взаимодействуют два сферических тела из АНЭ, помещенных в однородное магнитное поле $\boldsymbol{H}_0$, равна силе взаимодействия двух диполей (6) с магнитными моментами вида (5).

Подставив в формулы (1) и (3)-(5) параметры магнитных свойств материала $\mu^{(i)}$, a, и среды $\mu^{(e)}$, координаты и радиусы тел, величину H_0 и направление поля (угол α, см. Рис. 1), направления единичных векторов анизотропии $\boldsymbol{\tau}_1, \boldsymbol{\tau}_2$ (углы φ_{01} и φ_{02}, см. Рис. 1), можно численно определить силу $\boldsymbol{F}_{m1}$, действующую на первое сферическое тело из АНЭ со стороны второго тела.

Численные расчеты. Вычисления проводились при следующих параметрах, допустимых для реализации в эксперименте: $x_1 = 0$, $z_1 = 0$, $x_2 = 0{,}5$ см, $z_2 = 0$, $H_0 = 400$ Э, $\mu^{(e)}=1$, $\mu^{(i)}=1{,}05$, $a = 0{,}15$, $R_1 = R_2 = 0{,}18$ см. Рассматривались коллинеарные векторы анизотропии ($\varphi_{01} = \varphi_{02} = \varphi$) и различные направления магнитного поля: 0, $\pi/4$, $\pi/2$. При этом угол φ изменялся в пределах от 0 до π.

На рис. 2а и 2б линией 2 представлены зависимости, соответственно, x-компоненты и z-компоненты магнитной силы, действующей на первое тело, в зависимости от угла φ между горизонталью и направлением векторов анизотропии. Магнитное поле направлено вертикально ($\alpha = \pi/2$). Линией 1 показано соответствующее значение силы для изотропного образца (в этом случае $a = 0$).

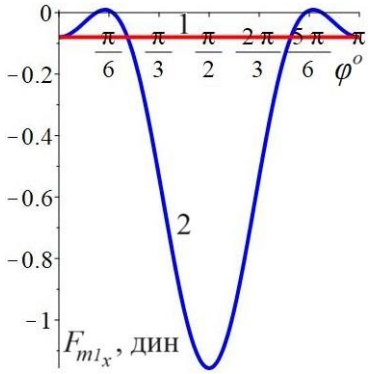

Рис. 2а: компонента силы вдоль оси x

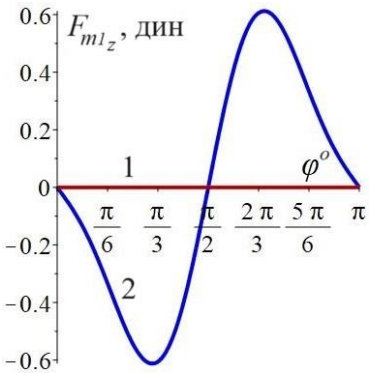

Рис. 2б: компонента силы вдоль оси z

Видно, что значения силы, с которой взаимодействуют изотропные тела, и силы взаимодействия аналогичных тел из АНЭ равны при $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$. При этом горизонтальная компонента силы для анизотропных тел при $\varphi = \pi/2$ на порядок превышает силу взаимодействия изотропных тел. Модуль вертикальной компоненты силы в данном случае для изотропных тел равен нулю, а для анизотропных имеет максимумы при $\varphi = 5\pi/16$ и $\varphi = 11\pi/16$.

На рис. 3а и 3б линией 2 представлены зависимости, соответственно, x-компоненты и z-компоненты магнитной силы, действующей на первое тело, в зависимости от угла φ. Магнитное поле направлено под углом $\alpha = \pi/4$. Линией 1 показано соответствующее значение силы для изотропного образца (в этом случае $a = 0$).

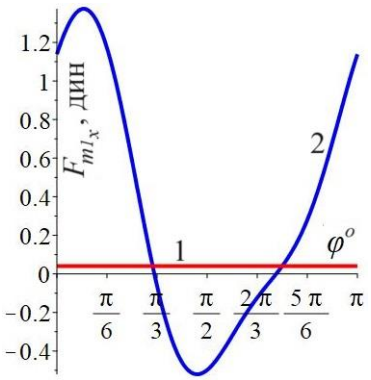

Рис. 3а: компонента силы вдоль оси x

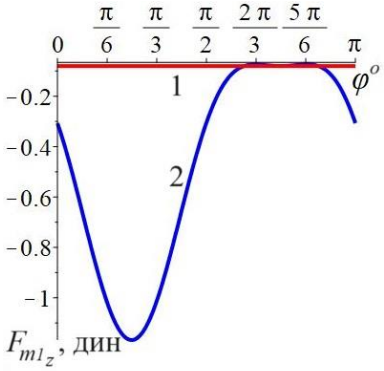

Рис. 3б: компонента силы вдоль оси z

Видно, что горизонтальная компонента магнитной силы, действующей на анизотропное тело, меняет свое направление в зависимости от угла φ, но практически всегда по величине превышает соответствующую компоненту силы взаимодействия изотропных тел. Модуль вертикальной компоненты силы в данном случае для тела из АНЭ имеет максимум при $\varphi = \pi/4$, а в диапазоне φ от $7\pi/12$ до $11\pi/12$ близок по значению к вертикальной компоненте силы взаимодействия изотропных тел.

На рис. 4а и 4б линией 2 представлены зависимости, соответственно, *x*-компоненты и *z*-компоненты магнитной силы, действующей на первое тело, в зависимости от угла φ. Магнитное поле направлено горизонтально ($\alpha = 0$). Линией 1 показано соответствующее значение силы для изотропного образца (в этом случае $a = 0$).

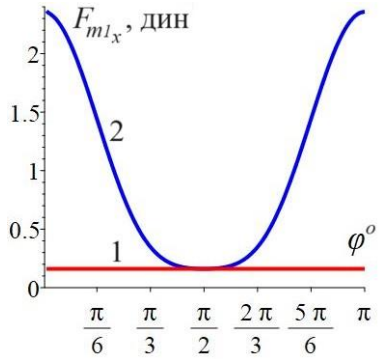

Рис. 4а: компонента силы вдоль оси x

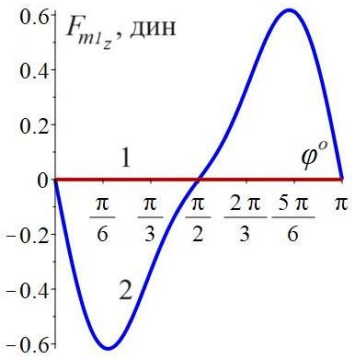

Рис. 4б: компонента силы вдоль оси z

Видно, что значения силы, с которой взаимодействуют изотропные тела, и силы взаимодействия аналогичных тел из АНЭ равны при $\varphi = \pi/2$. При этом горизонтальная компонента силы для анизотропных тел при $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$ на порядок превышает силу взаимодействия изотропных тел. Модуль вертикальной компоненты силы в данном случае для изотропных тел равен нулю, а для анизотропных имеет максимумы при $\varphi = 3\pi/16$ и $\varphi = 13\pi/16$.

Таким образом, исследована сила взаимодействия двух сферических тел из АНЭ в зависимости от направления коллинеарных векторов анизотропии при различных направлениях приложенного магнитного поля.

Заключение. Аналитически получена и исследована сила, действующая на сферическое тело из анизотропного намагничивающегося эластомера со стороны неоднородного магнитного поля, индуцированного вторым таким же телом. Данная сила представлена как сила взаимодействия двух диполей с магнитными моментами специального вида. Выполнены расчеты сил при различных параметрах задачи, таких как направления векторов анизотропии и приложенного магнитного поля. Получено, что при некоторых параметрах задачи сила взаимодействия анизотропных тел существенно превышает магнитную силу между такими же изотропными телами. Результаты данной работы могут быть полезны при создании мобильных роботов, содержащих тела из анизотропных намагничивающихся материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-71-10002, https://rscf.ru/project/20-71-10002/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.А. Налетова, Д.А. Пелевина, Д.И. Меркулов, В.А. Турков, Неоднозначность формы тела из намагничивающегося эластомера в неоднородном магнитном поле / В сб.: V Всероссийская научная конференция с международным участием «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» / Ставрополь: 2015. С. 190–196.

2. Д.И. Меркулов, В.А. Налетова, Д.А. Пелевина, В.А. Турков, Экспериментальное исследование бистабильности деформации тонкого тела из намагничивающегося эластомера в магнитном поле / В сб.: 17-я Международная Плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям / Иваново: 2016. С. 101–106.

3. А.А. Демин, Д.И. Меркулов, Д.А. Пелевина, В.А. Турков, В.А. Налетова, Определение параметров модели анизотропного намагничивающегося эластомера / В сб.: 18-я Международная Плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям / Иваново: 2018. С. 158–165.

4. Demin A.A., Merkulov D.I., Pelevina D.A., Kalmykov S.A., Naletova V.A., Determination of parameters of anisotropic magnetizable elastomer // Magnetohydrodynamics, 2019, Vol. 55, No. 3, pp. 347–352.

5. Д.И. Меркулов, Д.А. Пелевина, В.А. Турков, В.А. Налетова, Особенности движения

сферического тела из анизотропного намагничивающегося эластомера / В сб.: XX юбилейная Всероссийская с международным участием Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям / Иваново: 2022. С. 177–183.

6. Merkulov D.I., Pelevina D.A., Turkov V.A., Naletova V.A., Motion of an Anisotropic Magnetizable Elastomer in the Field of a Coil with Current Taking into Account the Interaction with Inclined Surface // Moscow University Mechanics Bulletin, 2023, Vol. 78, No 1, pp. 1-6.

7. Merkulov D.I., Pelevina D.A., Turkov V.A., Vinogradova A.S., Naletova V.A., Mobile robots with magnetizable materials in alternating uniform inclined magnetic fields // Acta Astronautica, 2021, Vol. 181, pp. 579-584.

8. Kim Y., Yuk H., Zhao R., Chester S.A., Zhao X., Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials // Nature, 2018, Vol. 558, No. 7709, pp. 274-279.

9. Yung K.W., Landecker P.B., Villani D.D., An analytic solution for the force between two magnetic dipoles. // Magnetic Electr. Sep., 1998, Vol. 9, pp. 39-52.