

УДК 537.621

## ТЕСТИРОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

© 2024 г. Д. И. Радушнов<sup>1</sup>, \*, А. Ю. Соловьева<sup>1</sup>, Е. А. Елфимова<sup>1</sup>, А. В. Чернышов<sup>2</sup>,  
А. Р. Закинян<sup>2</sup>, С. А. Куникин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь, Россия

\*E-mail: dmitry.radushnov@urfu.ru

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 29.04.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Исследованы магнитные свойства магнитополимерных композитных материалов. Выполнена верификация монодисперсной и бидисперсной теоретических моделей, учитывающих межчастичные диполь-дипольные взаимодействия, с помощью экспериментальных данных. Установлено, что бидисперсное приближение дает возможность воспроизводить экспериментальные результаты для реальных полидисперсных композитов.

**Ключевые слова:** магнитополимерный композит, намагниченность, диполь-дипольное взаимодействие, ориентационное текстурирование, магнитное поле, магнитный момент, ось легкого намагничивания

**DOI:** 10.31857/S0367676524100036, **EDN:** DTMUJ

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитополимерные композитные материалы синтезируются искусственно, путем внедрения магнитных наночастиц в полимерную матрицу [1–3]. Одним из способов получения таких композитов является полимеризация магнитных жидкостей. Магнитные жидкости представляют собой устойчивые коллоидные суспензии магнитных наночастиц в жидком носителе [4]. Если процесс полимеризации проводить во внешнем магнитном поле, то в образующемся магнитополимерном композите формируется ориентационное текстурирование осей легкого намагничивания наночастиц, которое будет определять магнитные свойства композита. Создавая различное ориентационное текстурирование в таких материалах, можно синтезировать композиты с управляемыми, заранее заданными свойствами, что востребовано в высокотехнологичных разработках, включая биомедицинские и промышленные технологии [5–9].

В последние годы активно проводятся исследования свойств магнитополимерных композитов с различной структурой [10, 11]. Для прогнозирования поведения таких материалов, были предложены теории, моделирующие определенную ориентационную текстуру композита. Так, например, в теоретических

работах [12, 13] был рассмотрен случай параллельной взаимной ориентации осей легкого намагничивания наночастиц в композите; в статьях [14, 15] изучались свойства системы с изотропной ориентацией осей легкого намагничивания; в работах [16–19] были исследованы свойства композитов, ориентационное текстурирование осей легкого намагничивания которых формировалось под действием постоянного магнитного поля. Учет влияния межчастичных диполь-дипольных взаимодействий на формируемую ориентационную текстуру композита проведен в работе [18] для монодисперсной модели магнитного наполнителя, в работе [19] — для бидисперсной системы. В настоящей статье представлены результаты магнитных измерений образцов магнитополимерных композитов, которые были синтезированы в однородном магнитном поле различной величины; теории [18, 19] будут использованы для описания полученных экспериментальных данных.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Для сопоставления с теоретическими моделями был получен композитный материал на основе полимерной эпоксидной смолы и наночастиц магнетита посредством замены жидкости носителя

классической магнитной жидкости на основе керосина на эпоксидную полимерную смолу. В эпоксидную смолу капельно вводилась керосиновая магнитная жидкость и под влиянием теплового и ультразвукового воздействия происходило их перемешивание, а также выпаривание керосина. Таким методом был получен однородный композит с одиночными наночастицами магнетита, равномерно распределенными по объему эпоксидной смолы. При воздействии внешнего магнитного поля, а также при последующей полимеризации данного композита однородность пространственного распределения частиц не нарушалась, а также не наблюдалось образование структур из частиц.

В эксперименте исследовался концентрационный ряд магнитополимерного композита с разными магнитными концентрациями. Для полимеризации в композит добавлялся отвердитель и после тщательного перемешивания состав помещался в кювету сферической формы. Полимеризация образца происходила во внешнем стационарном однородном магнитном поле, которое создавалось намагничивающей системой вибрационного магнетометра. Образец находился во внешнем магнитном поле до полной полимеризации, что составляло около 8 ч. За это время в системе устанавливалось равновесное ориентационное состояние, которое фиксировалось в результате полимеризации дисперсионной матрицы. Таким образом были получены образцы композита, полимеризованные в полях различной напряженности.

Дальнейшие измерения магнитных свойств полученных образцов были произведены при помощи вибрационного магнетометра. Так, были получены зависимости намагниченности от угла поворота образца относительно направления измерительного магнитного поля. Также были измерены кривые намагничивания образцов в двух ориентационных конфигурациях. В первом случае направление измерительного магнитного поля совпадало с направлением, которое имело магнитное поле в процессе полимеризации образца, во втором случае направления измерительного поля и поля полимеризации были перпендикулярны.

## ТЕОРИЯ

Магнитный наполнитель композита моделировался системой однородно-намагниченных сферических однодоменных магнитных частиц с одноосной магнито-кристаллической структурой. В монодисперсном приближении все частицы имели одинаковый диаметр, в бидисперсном случае в системе содержались частицы двух размеров (мелкие и крупные). Предполагалось, что на первом этапе частицы могли вращаться и перемещаться, моделируя поведение дисперсии частиц в феррожидкости. Под воздействием внешнего магнитного поля  $h^p$  и вследствие межчастичных диполь-дипольных взаимодействий в системе

формировалась равновесная текстура осей легкого намагничивания, которая фиксировалась вместе с положением частиц для моделирования процесса полимеризации жидкости-носителя. Полученная текстура описывалась одночастичной функцией распределения осей легкого намагничивания в монодисперсном приближении и парной функцией распределения осей легкого намагничивания случайной крупной и мелкой частиц в бидисперсном случае. На втором этапе текстурованный образец с обездвиженными магнитными частицами помещался в постоянное магнитное поле  $h$ , направленное параллельно  $h^p$ . Намагничивание этой системы происходило за счет суперпарамагнитного неелевского механизма. При этом функция распределения, описывающая ориентационную текстуру ансамбля частиц, сформированная на первом этапе, сохранялась на втором этапе процесса. Основываясь на вириальном разложении функции распределения с точностью до первого порядка по восприимчивости Ланжевена  $\chi_L$  в работах [18, 19] были выведены аналитические формулы намагниченности описанной выше системы обездвиженных частиц. Для монодисперсной системы формула намагниченности имеет вид [18]:

$$M = \frac{\rho m}{2R(\alpha^p, \sigma)} \left\{ \int_0^\pi \frac{P(\alpha^p, \sigma, \xi_1)}{P(\alpha, \sigma, \xi_1)} \frac{\partial P(\alpha, \sigma, \xi_1)}{\partial \alpha} \sin \xi_1 d\xi_1 \times \right. \\ \times \left[ 1 - \frac{\chi_L}{4R^2(\alpha^p, \sigma)} \left( \int_0^\pi \frac{\partial P(\alpha^p, \sigma, \xi_2)}{\partial \alpha^p} \sin \xi_2 d\xi_2 \right)^2 \right] + \\ + \frac{\chi_L}{2} \int_0^\pi \frac{\partial P(\alpha, \sigma, \xi_2)}{\partial \alpha} \frac{\sin \xi_2}{P(\alpha, \sigma, \xi_2)} d\xi_2 \int_0^\pi \frac{P(\alpha^p, \sigma, \xi_1)}{P(\alpha, \sigma, \xi_1)} \times \\ \times \left[ \frac{\partial^2 P(\alpha, \sigma, \xi_1)}{\partial \alpha^2} - \frac{1}{P(\alpha, \sigma, \xi_1)} \left( \frac{\partial P(\alpha, \sigma, \xi_1)}{\partial \alpha} \right)^2 \right] \sin \xi_1 d\xi_1 + \\ + \frac{\chi_L}{2R(\alpha^p, \sigma)} \int_0^\pi \frac{\partial P(\alpha, \sigma, \xi_1)}{\partial \alpha} \frac{\partial P(\alpha^p, \sigma, \xi_1)}{\partial \alpha^p} \frac{\sin \xi_1}{P(\alpha, \sigma, \xi_1)} d\xi_1 \times \\ \times \left. \int_0^\pi \frac{\partial P(\alpha^p, \sigma, \xi_2)}{\partial \alpha^p} \sin \xi_2 d\xi_2 \right\}, \quad (1)$$

$$P(\alpha, \sigma, \xi_i) =$$

$$= \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \exp(\sigma t^2 + \alpha t \cos \xi_i) I_0(\alpha \sqrt{1-t^2} \sin \xi_i) dt, \quad (2)$$

$$R(\alpha^p, \sigma) = \frac{\sinh \alpha^p}{\alpha^p} \int_0^1 \exp(\sigma t^2) dt, \quad (3)$$

где  $\chi_L = 8\lambda\phi$ ,  $\lambda = \frac{\mu_0 m^2}{\pi k_B T d^3}$  — параметр диполь-дипольного взаимодействия,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость

вакуума,  $m$  — магнитный момент наночастицы,  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $d$  — магнитный диаметр частицы,  $\phi = \frac{\rho \pi d^3}{6}$  — объемная концентрация частиц,  $\rho$  — числовая концентрация частиц в образце,  $\sigma = \frac{K \pi d^3}{6 k_B T}$  — параметр магнитной анизотропии частиц,  $K$  — константа магнитной анизотропии,  $\alpha = \frac{\mu_0 m h}{k_B T}$  — параметр Ланжевена, характеризующий интенсивность магнитного поля; верхний индекс в  $\alpha^p$  означает, что параметр Ланжевена рассчитан для магнитного поля  $h^p$ , в котором проходила полимеризация жидкости-носителя.

Для бидисперсной системы, состоящей из крупных ( $l$ ) и мелких ( $s$ ) частиц, намагниченность складывается из парциальной намагниченности  $M_{sl}$  мелких частиц в системе с учетом влияния на них крупных частиц и намагниченности  $M_{ls}$  крупных частиц в системе с учетом влияния на них мелких [19]:

$$M = M_{sl} + M_{ls} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_{ab} = & \frac{\rho_a m_a}{2R(\alpha_a^p, \sigma_a)} \left\{ \int_0^\pi P(\alpha_a^p, \sigma_a, \xi_a) \frac{\partial \ln P(\alpha_a, \sigma_a, \xi_a)}{\partial \alpha_a} \sin \xi_a d\xi_a \times \right. \\ & \times \left[ 1 - \frac{\chi_L^{aa} G^2(\alpha_a^p, \sigma_a)}{2R^2(\alpha_a^p, \sigma_a)} - \frac{\chi_L^{ab} G(\alpha_a^p, \sigma_a) G(\alpha_b^p, \sigma_b)}{2R(\alpha_a^p, \sigma_a) R(\alpha_b^p, \sigma_b)} \right] + \\ & + \left[ \frac{\chi_L^{aa} G(\alpha_a^p, \sigma_a)}{2R(\alpha_a^p, \sigma_a)} + \frac{\chi_L^{ab} G(\alpha_b^p, \sigma_b)}{2R(\alpha_b^p, \sigma_b)} \right] \int_0^\pi \frac{\partial P(\alpha_a^p, \sigma_a, \xi_a)}{\partial \alpha_a^p} \frac{\partial \ln P(\alpha_a, \sigma_a, \xi_a)}{\partial \alpha_a} \sin \xi_a d\xi_a + \\ & + \frac{1}{4} \left[ \frac{\chi_L^{ab}}{R(\alpha_b^p, \sigma_b)} \int_0^\pi P(\alpha_b^p, \sigma_b, \xi_b) \frac{\partial \ln P(\alpha_b, \sigma_b, \xi_b)}{\partial \alpha_b} \sin \xi_b d\xi_b + \chi_L^{aa} \frac{\partial \ln P(\alpha_a, \sigma_a, \xi_a)}{\partial \alpha_a} \right] \times \\ & \times \left[ \int_0^\pi \frac{P(\alpha_a^p, \sigma_a, \xi_a)}{P(\alpha_a, \sigma_a, \xi_a)} \frac{\partial^2 P(\alpha_a, \sigma_a, \xi_a)}{\partial (\alpha_a)^2} \sin \xi_a d\xi_a - \int_0^\pi P(\alpha_a^p, \sigma_a, \xi_a) \left( \frac{\partial \ln P(\alpha_a, \sigma_a, \xi_a)}{\partial \alpha_a} \right)^2 \sin \xi_a d\xi_a \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$G(\alpha_b^p, \sigma_b) = \frac{1}{2} \int_0^\pi \frac{\partial P(\alpha_a^p, \sigma_a, \xi_a)}{\partial \alpha_a^p} \sin \xi_a d\xi_a, \quad (6)$$

где  $\chi_L^{ss} = \frac{\mu_0 \rho_s m_s^2}{3k_B T}$  — восприимчивость Ланжевена для мелких частиц,  $\chi_L^{ll} = \frac{\mu_0 \rho_l m_l^2}{3k_B T}$  — восприимчивость Ланжевена для крупных частиц,  $\chi_L^{sl} = \frac{\mu_0 (\rho_s + \rho_l) m_s m_l}{3k_B T}$  — восприимчивость Ланжевена для мелких и крупных частиц,  $m_s$  — магнитный момент мелких наночастиц,  $m_l$  — магнитный момент крупных наночастиц,  $\rho_s = \rho v_s$  — числовая концентрация мелких частиц в образце,  $\rho_l = \rho v_l$  — числовая концентрация крупных

частиц в образце,  $v_s$  — доля мелких частиц в системе,  $v_l$  — доля крупных частиц в системе. Стоит отметить, что намагниченность бидисперсной системы (4), (5) совпадает с намагниченностью монодисперсной системы (1) в случае, когда  $d_s = d_l$ ,  $v_s = 1$ ,  $v_l = 0$  или  $d_s = d_l$ ,  $v_s = 0$ ,  $v_l = 1$ .

## СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

В теории предполагается, что образец имеет форму цилиндрической трубки, вытянутой вдоль направления магнитного поля. Такая конфигурация позволяет пренебречь размагничивающими полями, и считать внешнее поле  $h_{ext}$  равным магнитному полю внутри образца  $h_{in}$ . В эксперименте образец имел сферическую форму, поэтому в системе присутствовали эффекты размагничивания. При сопоставлении теории и эксперимента размагничивающий фактор учитывался следующим образом:

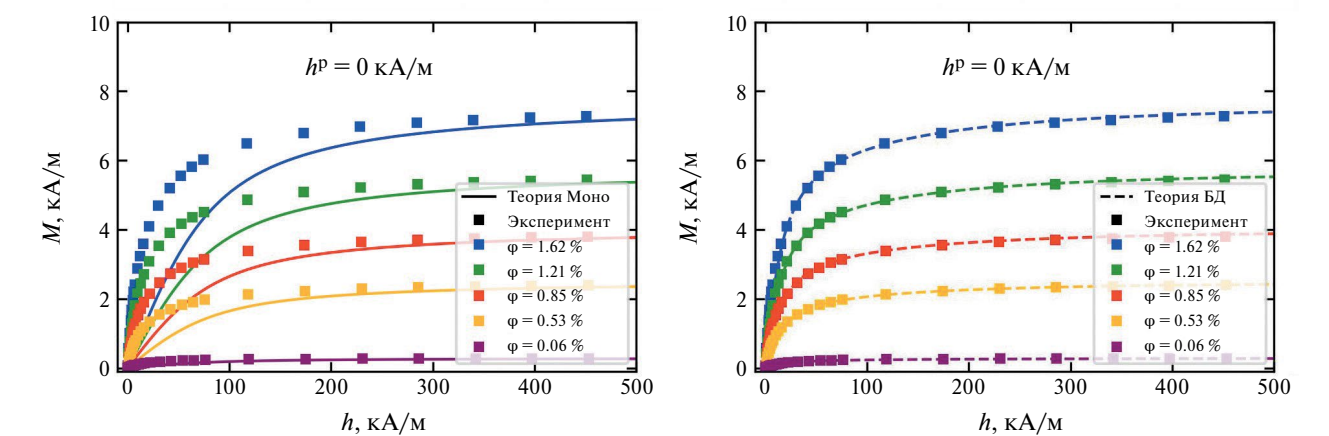
$$h_{ext} = h_{in} + \frac{1}{3} M(h_{in}) \quad (7)$$

где  $1/3$  — коэффициент размагничивания для сферы.

Основываясь на экспериментальных данных, в теоретических расчетах использовались следующие параметры системы: температура  $T = 295$  К, намагниченность насыщения материала наночастиц (магнетит)  $M_0 = 478$  кА · м<sup>-1</sup>, константа магнитной анизотропии  $K = 15$  кДж · м<sup>-3</sup> [20] и средний размер магнитного ядра в образце 7.13 нм. Следовательно, для монодисперсной модели можно вычислить основные характеристики частиц:  $m = 0.907183 \cdot 10^{-19}$  Ам<sup>2</sup>,  $\sigma = 0.69896$ ,  $\lambda = 0.557463$ ,  $\phi$ ,  $\rho$  и  $\chi_L$  приведены в табл. 1. На рис. 1а

**Таблица 1.** Параметры монодисперсной системы. Объемная доля магнитных частиц  $\phi$ , концентрация частиц в системе  $\rho$ , восприимчивость Ланжевена  $\chi_L$ .

|                     |                      |                      |                      |                      |                      |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\phi$              | 1.62 %               | 1.21 %               | 0.85 %               | 0.53 %               | 0.06 %               |
| $\rho\text{м}^{-3}$ | $8.5358\cdot10^{22}$ | $6.3755\cdot10^{22}$ | $4.4787\cdot10^{22}$ | $2.7926\cdot10^{22}$ | $0.3161\cdot10^{22}$ |
| $\chi_L$            | 0.072247             | 0.053962             | 0.037908             | 0.023636             | 0.002698             |



**Рис. 1.** Кривые намагниченности магнитополимерных образцов в зависимости от магнитного поля  $h_{in}$  для разных значений объемной доли магнитных наночастиц  $\phi$ . Синтез образцов проводился в отсутствии магнитного поля. Символами обозначены данные из эксперимента, а) сплошная линия соответствует теоретическим результатам монодисперсной теории (1), б) пунктирная линия соответствует бидисперсной теории (4), (5).

представлено сравнение монодисперсной теории (1) с результатами экспериментальных измерений, проведенных для образцов разной концентрации, полимеризованных в отсутствие магнитного поля ( $\alpha^p = 0$ ). Видно, что монодисперсная модель является достаточно грубым приближением, различия между монодисперсной теорией (сплошные линии) и экспериментальными данными (точки) значительные, что может быть объяснено полидисперсностью экспериментального образца.

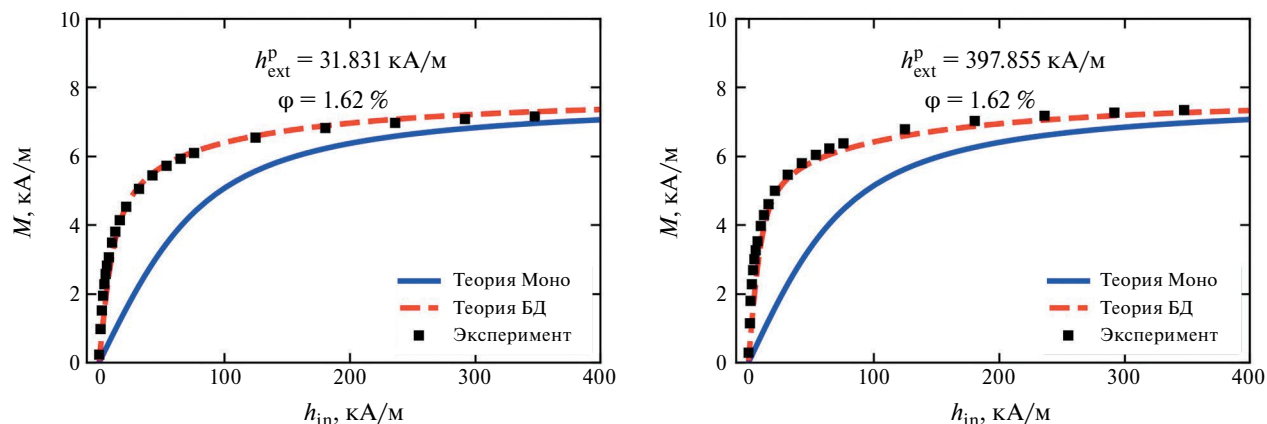
Для сопоставления бидисперсной теории с экспериментальными данными параметры частиц крупной и мелкой фракций выбирались так, чтобы выполнялось два условия: (а) средний размер частиц бидисперсной системы соответствовал экспериментальному значению среднего диаметра частиц  $d_s v_s + d_l v_l = 7.13$  нм и (б) теоретические кривые намагниченности для образцов, синтезируемых в отсутствии магнитного поля, наилучшим образом

соответствовали экспериментальным измерениям. Оба эти условия выполняются при следующих параметрах:  $d_s = 5.23$  нм,  $v_s = 0.72$ ,  $d_l = 12$  нм,  $v_l = 0.28$ . Соответствующие параметры, характеризующие частицы в бидисперсной системе, принимают значения:  $\sigma_s = 0.275861$ ,  $\sigma_l = 3.332179$ ,  $\lambda_s = 0.220015$ ,  $\lambda_l = 2.657611$ ,  $m_s = 0.35804 \cdot 10^{-19}$  А·м<sup>2</sup>,  $m_l = 4.342938 \cdot 10^{-19}$  А·м<sup>2</sup>,  $\rho$ ,  $\phi_s$ ,  $\phi_l$ ,  $\chi_L^{ss}$  и  $\chi_L^{ll}$  приведены табл. 2. Хорошее согласование бидисперсной теории (пунктирные линии) с экспериментальными данными (точки) продемонстрировано на рис. 1б.

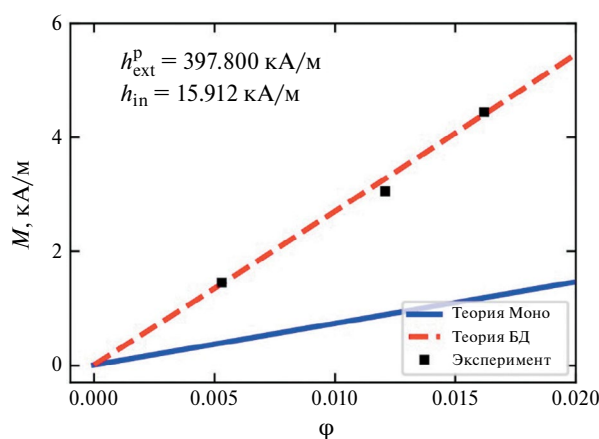
Определенные выше параметры монодисперсной и бидисперсной систем в дальнейшем использовались для расчета намагниченности образцов с анизотропной ориентационной текстурой, полимеризация жидкости-носителя в которых проводилась во внешнем магнитном поле  $h_{ext}^p = 31.831$  кА·м<sup>-1</sup> (рис. 2а) и  $h_{ext}^p = 397.855$  кА·м<sup>-1</sup> (рис. 2б). Тестирование теоретических результатов было проведено

**Таблица 2.** Параметры бидисперсной системы. Объемная доля крупных  $\phi_l$  и мелких  $\phi_s$  магнитных частиц, концентрация частиц в системе  $\rho$ , восприимчивость Ланжевена крупных  $\chi_L^{ll}$  и мелких  $\chi_L^{ss}$  частиц.

|                     |                      |                      |                      |                     |                      |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| $\phi$              | 1.62 %               | 1.21 %               | 0.85 %               | 0.53 %              | 0.06 %               |
| $\rho\text{м}^{-3}$ | $5.2723\cdot10^{22}$ | $3.9379\cdot10^{22}$ | $2.8431\cdot10^{22}$ | $1.725\cdot10^{22}$ | $0.1952\cdot10^{22}$ |
| $\phi_l$            | 1.3357 %             | 0.9976 %             | 0.6945 %             | 0.4369 %            | 0.0494 %             |
| $\phi_s$            | 0.2843 %             | 0.2124 %             | 0.1555 %             | 0.0931 %            | 0.0106 %             |
| $\chi_L^{ll}$       | 0.283974             | 0.212104             | 0.147665             | 0.092905            | 0.010518             |
| $\chi_L^{ss}$       | 0.005005             | 0.003738             | 0.002736             | 0.001637            | 0.000185             |



**Рис. 2.** График намагниченности для образцов с объемной долей магнитных наночастиц  $\phi = 1.62\%$  в зависимости от магнитного поля  $h_{in}$ . Поле полимеризации  $h_{ext}^p = 31.831$  (a),  $397.855 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$ . Сплошная линия соответствует монодисперсной теории (1), пунктирная линия — бидисперсная теория (4), (5), символами обозначены данные из эксперимента. Значения параметров Ланжевена, соответствующих полям полимеризации  $h_{ext}^p = 31.831 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$  и  $h_{ext}^p = 397.855 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$ , для монодисперсной системы равны  $a^p = 0.84$  и  $a^p = 11.07$ , для бидисперсной системы —  $a_s^p = 0.33$ ,  $a_l^p = 4.04$  и  $a_s^p = 4.39$ ,  $a_l^p = 52.98$ .



**Рис. 3.** График намагниченности в зависимости от объемной доли магнитных наночастиц  $\phi$  для образцов, синтезированных в магнитном поле  $h_{ext}^p = 397.800 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$  и находящихся в магнитном поле  $h_{in} = 15.912 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$ . Сплошная линия соответствует теоретическим результатам монодисперсной теории (1); пунктирная линия соответствует бидисперсной теории (4), (5); символами обозначены данные из эксперимента. Значения параметров Ланжевена, соответствующих полям  $h_{ext}^p = 397.800 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$  и  $h_{in} = 15.912 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$  равны для монодисперсной модели  $a^p = 11.06$  и  $a = 0.45$ , для бидисперсной модели  $a_s^p = 4.39$ ,  $a_l^p = 52.97$  и  $a_s = 0.18$ ,  $a_l = 2.13$ .

на экспериментальных данных для образцов с самой высокой концентрацией магнитного наполнителя  $\phi = 1.62\%$ . Бидисперсная модель достаточно точно описывает экспериментальные данные для анизотропных образцов, в то время как монодисперсная теория демонстрирует гораздо меньшую намагниченность в сравнении с экспериментальными наблюдениями.

Зависимость намагниченности от концентрации образцов, синтезированных при внешнем магнитном поле  $h_{ext}^p = 397.800 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$  и находящихся в магнитном поле  $h_{in} = 15.912 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$ , представлена на рис. 3. Синяя сплошная линия соответствует монодисперсной теории, красная пунктирная — бидисперсной, точки — данные эксперимента. Из графика видно, что бидисперсная теория гораздо лучше согласуется с экспериментальными данными в сравнении с монодисперсной теорией. Таким образом, магнитные свойства реальных магнитополимерных композитов могут быть хорошо описаны уже на уровне бидисперсного приближения, предложенного в [19].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены экспериментальные результаты измерений намагниченности образцов магнитополимерных композитов с разными концентрациями магнитного наполнителя. Полимеризация образцов выполнена при различных интенсивностях внешнего магнитного поля. Для анализа полученных данных использованы две теоретические модели: монодисперсная и бидисперсная. Параметры теоретических моделей выбирались на основе экспериментальных данных.

Наилучшее согласие между теоретическими результатами и экспериментальными измерениями было достигнуто в бидисперсном приближении. Это подтверждает эффективность использования бидисперсной теории при описании свойств реальных полидисперсных образцов. Таким образом, теория [19] может быть использована для описания и прогнозирования магнитных свойств магнитополимерных композитных материалов с анизотропной ориентационной текстурой.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00039).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lu Q., Choi K., Nam J.D., Choi H.J.* // *Polymers*. 2021. No. 4. P. 512.
2. *Merazzo K.J., Lima A.C., Rincón-Iglesias M. et al.* // *Mater. Hor.* 2021. No. 8 P. 2654.
3. *Амиров А.А., Каминский А.С., Архипова Е.А. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87. № 6. С. 813; *Amirov A.A., Kaminskiy A.S., Arkhipova E.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2023. V. 87. No. 6. P. 715.
4. *Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О.* Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1989. 387 с.
5. *Rodriguez-Arco L., Rodriguez I.A., Carriel V. et al.* // *Nanoscale*. 2016. No. 15. P. 8136.
6. *Campos F., Bonhome-Espinosa A.B., Carmona R. et al.* // *Mater. Sci. Eng. C*. 2021. No. 118. P. 111476.
7. *Kazantseva N.E., Smolkova I.S., Babayan V. et al.* // *Nanomaterials*. 2021. No. 12. P. 3402.
8. *Sharma A., Mangla D., Shehnaz, Chaudhry S.A.* // *J. Environ. Manage.* 2022. No. 306. P. 114483.
9. *Алехина Ю.А., Макарова Л.А., Наджарьян Т.А. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 7. С. 882; *Alekhina Y.A., Makarova L.A., Nadzharyan T.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 7. P. 801.
10. *Петров Д.А.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2022. Т. 86. № 2. С. 165; *Petrov D.A.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2022. V. 86. No. 2. P. 115.
11. *Юрасов А.Н., Яшин М.М., Ганьшина Е.А. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2022. Т. 86. № 5. С. 716; *Yurasov A.N., Yashin M.M., Ganshina E.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2022. V. 86. No. 5. P. 601.
12. *Elfimova E.A., Ivanov A.O., Camp P.J.* // *Nanoscale*. 2019. No. 11. P. 21834.
13. *Ambarov A.V., Zverev V.S., Elfimova E.A.* // *Phys. Rev. E*. 2023. V. 107. Art. No. 024601.
14. *Zubarev A.* // *Phys. Rev. E*. 2018. V. 98. Art. No. 032610.
15. *Elfimova E.A., Iskakova L.Y., Solovyova A.Y., Zubarev A.Y.* // *Phys. Rev. E*. 2021. V. 104. Art. No. 054616.
16. *Raikher Y.* // *JMMM*. 1983. No. 39. P. 11.
17. *Solovyova A.Y., Elfimova E.A., Ivanov A.O.* // *Phys. Rev. E*. 2021. V. 104. Art. No. 064616.
18. *Radushnov D.I., Solovyova A.Y., Elfimova E.A.* // *Nanoscale*. 2022. No. 14. P. 10493.
19. *Radushnov D.I., Solovyova A.Y., Elfimova E.A.* // *Polymers*. 2023. No. 15. P. 2678.
20. *Odenbach S.* // In: *Magnetoviscous effects in ferrofluids*. Berlin, Heidelberg, 2002. P. 151.

## Testing theoretical models on experimental data of magnetization of magnetopolymer composites

**D. I. Radushnov<sup>1,\*</sup>, A. Yu. Solovyova<sup>1</sup>, E. A. Elfimova<sup>1</sup>, A. V. Chernyshov<sup>2</sup>,  
A. R. Zakinyan<sup>2</sup>, S. A. Kunikin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Ural Federal University, Yekaterinburg, 620000 Russia*

<sup>2</sup>*North Caucasus Federal University, Stavropol, 355017 Russia*

\*e-mail: dmitry.radushnov@urfu.ru

Magnetic properties of magnetopolymer composite materials were studied. Monodisperse and bidisperse theoretical models considering interparticle dipole-dipole interactions were verified using experimental data. It was obtained that the bidisperse approximation well describe the experimental results for real polydisperse composites.

**Keywords:** magnetopolymer composite, magnetization, dipole-dipole interaction, orientation texturing, magnetic field, magnetic moment, easy magnetization axis.