

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА
**«Моделирование свойств композитов на основе
магнитных эластомеров»**

Выполнил студент

419 группы

Исаенко Матвей Борисович

Научный руководитель

к.ф.м.н., ассистент

Макарова Людмила Александровна

Допущена к защите

Зав.кафедрой _____

Москва

2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Обзор литературы	5
Глава 2. Методы	13
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	22
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	23
БЛАГОДАРНОСТИ	26

ВВЕДЕНИЕ

Композитные материалы нашли широкое применение в науке и технике. Различными комбинациями упругого каркаса (матрицы) и наполнителя можно добиваться уникальных свойств, которые нельзя наблюдать в однофазных структурах. Эти свойства сильно зависят от различных внешних и внутренних параметров, что делает композитные материалы особенно интересными объектами для научных исследований.

Особое место среди композитов занимают материалы на основе магнитных эластомеров. Магнитные эластомеры (МЭ) состоят из упругой полимерной матрицы и распределенных внутри ферро- (ферри-) магнитных частиц микро- или наноразмеров. Комбинация магнитных и упругих свойств приводит к ряду впечатляющих явлений, возникающих во внешнем магнитном поле. Такие композиты, содержащие магнитные частицы (здесь и далее под термином “магнитные частицы” будут пониматься ферро- или ферритмагнитные частицы), заключенные в полимерную оболочку, имеют множество практических приложений. Они могут найти применение в медицинских целях: разделение определенных клеток и других биологических объектов, контролируемая доставка лекарств. Особенный интерес представляет использование подобных магнитных композитов в качестве мягких актуаторов для роботов и прочих устройств.

Подобные композитные материалы из-за целого набора свойств называют “умными”. Такое название обусловлено в том числе изменением этих свойств при воздействии различного рода внешних факторов, таких как внешнее магнитное или электрическое поле, свет переменной интенсивности, температура, кислотность среды и т.д. При этом в зависимости от поставленной практической задачи свойства МЭ можно

изменять, варьируя состав, форму, концентрацию наполнителя, состав полимерной матрицы или способ изготовления образца. Например, в МЭ с добавлением сегнетоэлектрических (СЭ) частиц наряду с ферромагнитными (ФМ) можно наблюдать магнитоэлектрический эффект (МЭЭ). Он заключается в индуцировании или изменении электрической поляризации образца во внешнем магнитном поле. Кратко механизм такого преобразования можно описать следующим образом: внешнее магнитное поле вызывает смещение ферромагнитных частиц, которое в свою очередь за счет полимерных связей вызывает смещение сегнетоэлектрических частиц и, как следствие, изменение электрической поляризации всего образца. Изучение подобных эффектов является одной из актуальных задач современной науки, особенно, учитывая возрастающую роль информационных технологий, в которых этот класс материалов может найти широкое применение.

В данной работе было проведено численное моделирование МЭЭ в композитном материале на основе МЭ и СЭ частиц с целью исследования механизмов его возникновения.

Глава 1. Обзор литературы

Композиты на основе магнитных эластомеров (МЭ) состоят из упругой полимерной матрицы и распределенных внутри нее ферро- или ферримагнитных частиц [1]. Благодаря своей эффективности, дешевизне и простоте в изготовлении, МЭ нашли применение во многих областях промышленности и техники, а также в области биомедицины. Их можно использовать как для адресной доставки лекарств, так и для создания актуаторов, искусственных мышц, датчиков, демпферов, клапанов и т.д [2].

Из-за способности МЭ реагировать на разного рода внешние воздействия их относят к классу “умных материалов” [3]. Комбинация упругих и магнитных свойств, а также их взаимное влияние друг на друга приводят к возникновению в таких материалах уникального набора эффектов и представляют большой интерес для ученых. В качестве наиболее характерных классу МЭ эффектов можно выделить прямой и обратный магнитодеформационный эффект, магнитореологический эффект и эффект памяти формы [4].

Помимо взаимосвязи магнитных и упругих свойств в МЭ в зависимости от их параметров могут наблюдаться различные эффекты, демонстрирующие связь магнитных и электрических свойств. Например, были обнаружены зависимости диэлектрической проницаемости и электрического сопротивления [5, 6] МЭ от внешнего магнитного поля. Эти эффекты связаны с перестроением ферромагнитных (ФМ) частиц во внешнем магнитном поле.

На рис.1 представлены результаты эксперимента из работы [5]. График иллюстрирует зависимость электрического сопротивления образцов с разными по составу добавками к наполнителю (A1 —

$\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.2}\text{Mg}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и A2 — $\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.1}\text{Mg}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$) от приложенной механической нагрузки.

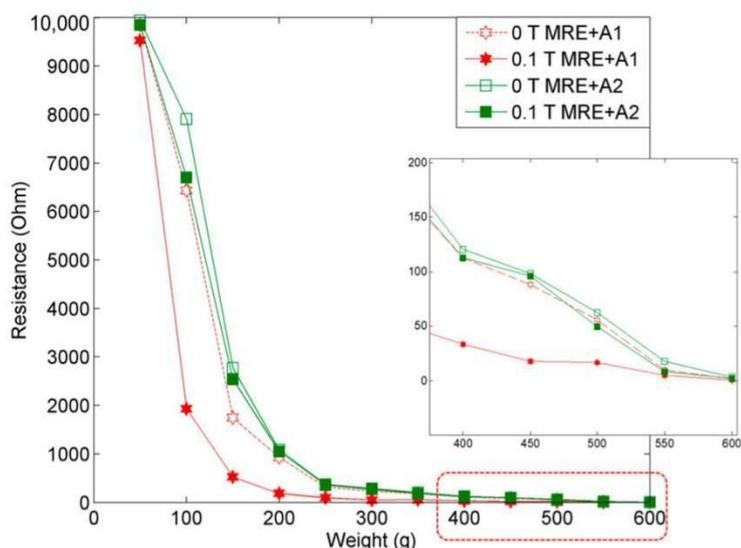


Рисунок 1. Сравнение зависимостей электрического сопротивления образцов МЭ от механической нагрузки с выключенным полем (0 T) и включенным (0,1 T) [5].

Авторы отмечают, что для малых значений нагрузки сопротивление образцов уменьшается при включении внешнего поля. Кроме того, сопротивление уменьшается с увеличением веса нагрузки и значение сопротивления для образца с A2 (с большей концентрацией магния) превышает значение для образца с A1 на величину от 1% до 400% как при включенном, так и при выключенном магнитном поле.

В работах [6, 7] представлены результаты моделирования магнитодиэлектрического эффекта (МДЭ), который заключается в изменении эффективной диэлектрической проницаемости образца во внешнем магнитном поле. На рис. 2 представлено сравнение экспериментальных результатов (справа) с кривыми, полученными в результате численного моделирования (слева).

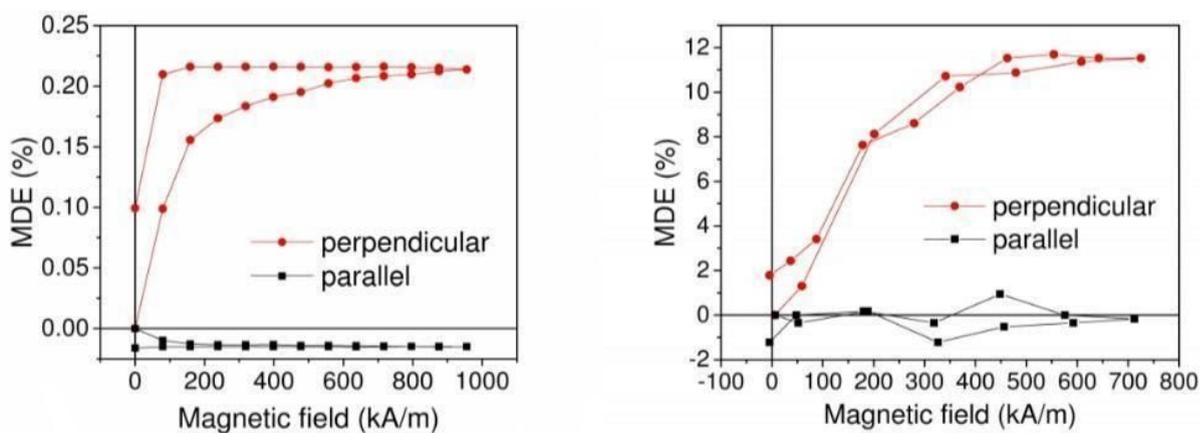


Рисунок 2. Сравнение смоделированной полевой зависимости МДЭ (слева) с экспериментальными данными (справа) при приложении магнитного поля перпендикулярно и параллельно обкладкам конденсатора [6].

Авторы отмечают, что кривые, полученные экспериментально и теоретически, качественно согласуются, в то время как значительное количественное расхождение результатов может быть связано с разными параметрами исследуемых образцов.

Механизм эффекта можно описать следующим образом: ФМ частицы под действием внешнего магнитного поля смещаются, стремясь выстроиться вдоль его силовых линий. При этом изменяется емкость плоского конденсатора, заполненного образцом, что может трактоваться как изменение эффективной диэлектрической проницаемости эластомера, вызванное внешним магнитным полем (МДЭ).

Материалы, в которых присутствует два типа ферро-упорядочения (ферромагнитное и ферроэлектрическое), называют мультиферроиками. Мультиферроики, в которых наблюдается связь между намагниченностью и электрической поляризацией, называют магнитоэлектрическими. Было показано, что такие материалы могут лежать в основе MERAM (magneto-electric random access memory), которая позволяет получить доступ к любой ячейке памяти за одно и то же время вне зависимости от ее расположения [8]. Не так много материалов проявляют

магнитоэлектрические свойства при комнатной температуре. При этом однофазные образцы позволяют наблюдать только малый по величине эффект, что сильно ограничивает сферу их практического применения [9]. Таким образом, внимание ученых привлекли материалы, в которых магнитоэлектрический эффект происходит за счет механического взаимодействия между сегнетоэлектрической и ферромагнитной составляющими [10].

В недавних исследованиях экспериментально была показана возможность создания мультиферроиков на основе МЭ с добавлением сегнетоэлектрических (СЭ) частиц [11]. Сосуществование ФМ и СЭ частиц, соединенных упругим взаимодействием с помощью молекул полимера, приводит к возникновению эффектов, не наблюдаемых в обычных МЭ. Прямой и обратный магнитоэлектрический эффекты (МЭЭ) относятся к таким. Прямой МЭЭ заключается в изменении или индуцировании электрической поляризации образца при приложении внешнего магнитного поля.

Структура мультиферроика совсем не обязательно должна строго соответствовать приведенной выше (СЭ и ФМ частицы внутри полимерной матрицы). В исследовании [12] показаны экспериментальные результаты МЭЭ в гетероструктуре, содержащей чередующиеся слои кобальта и цирконата-титаната свинца (ЦТС) (рис. 3). Авторами было выявлено, что при такой конфигурации материала максимум МЭЭ наблюдается при толщине ЦТС-слоя между 2 и 2,5 мкм.

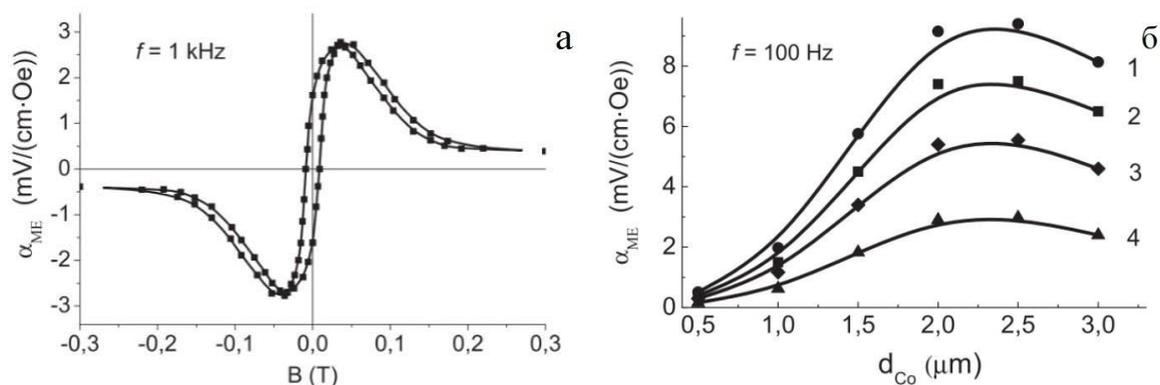


Рисунок 3. а) Коэффициент МЭЭ на частоте 1 кГц для гетероструктуры Co/ЦТС/Co; б) Коэффициент МЭЭ в зависимости от толщины слоя ЦТС. Толщина ЦТС-слоя (1) 100 мкм, (2) 200 мкм, (3) 300 мкм и (4) 400 мкм [12].

Рис. 4 иллюстрирует один из возможных составов и структуру мультиферроика на основе МЭ.

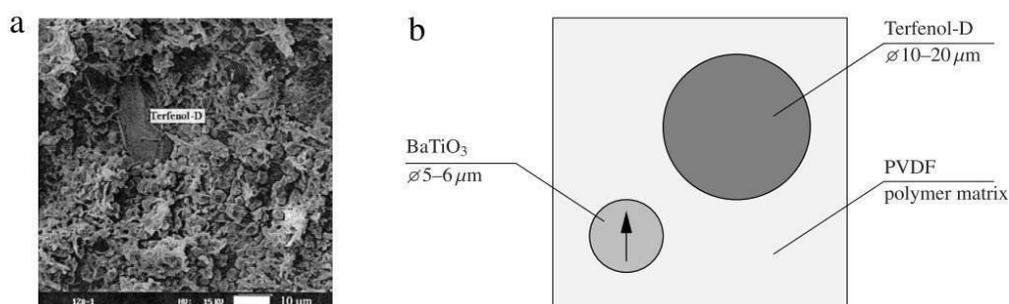


Рисунок 4. Магнитоэлектрические композиты, а) микроснимок трехфазного композита; б) схематичная иллюстрация состава материала [13].

В качестве ФМ частиц здесь используется магнитоэлектрический сплав терфенол-Д, СЭ частицы представлены BaTiO₃, а полимерная матрица — поливинилиденфторид (ПВДФ).

В статье [13] представлены результаты (рис. 5) численного моделирования МЭЭ в системе из полимерной матрицы, содержащей магнитоэлектрическую частицу CoFe₂O₄ и случайно распределенные в объеме СЭ частицы BaTiO₃.

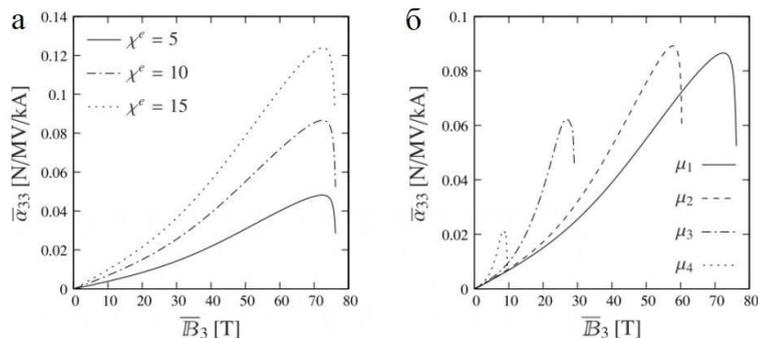


Рисунок 5. Коэффициент МЭЭ для материала с фиксированной жесткостью матрицы и различной диэлектрической восприимчивостью $\chi_e = \{5, 10, 15\}$ (а); для материала с фиксированной диэлектрической восприимчивостью и варьирующейся жесткостью матрицы $\mu_i = \{128.00, 70.40, 12.80, 1.28\} \cdot 10^{-5} \text{ Н/мкм}^2$ (б) [13].

Авторы исследования пришли к выводу, что МЭЭ возрастает с увеличением электрической восприимчивости, однако значение магнитного поля, при котором достигается максимум, остается практически неизменным (рис. 5а). Авторы также провели исследование влияния жесткости матрицы на эффект, и оказалось, что в образцах с более мягкой матрицей максимум МЭЭ достигается в меньших полях (рис. 5б).

В исследовании [9] демонстрируется другой тип мультиферроиков. Авторы проводили теоретическое исследование и моделирование двухфазного магнитоэлектрического композита (рис. 6), состоящего из упругой СЭ матрицы на основе BaTiO_3 и ФМ включений CoFe_2O_4 .

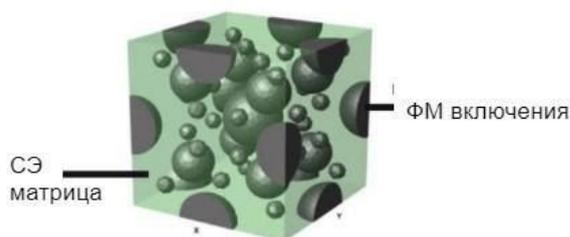


Рисунок 6. Материал на основе сегнетоэлектрической матрицы (BaTiO_3) и пьезомагнитных (CoFe_2O_4) включений [9].

В этой работе было проведено сравнение магнитоэлектрического отклика для материала с частицами разной формы: сферическими и цилиндрическими. Схематичное изображение частиц и полученные графики представлены на рис. 7.

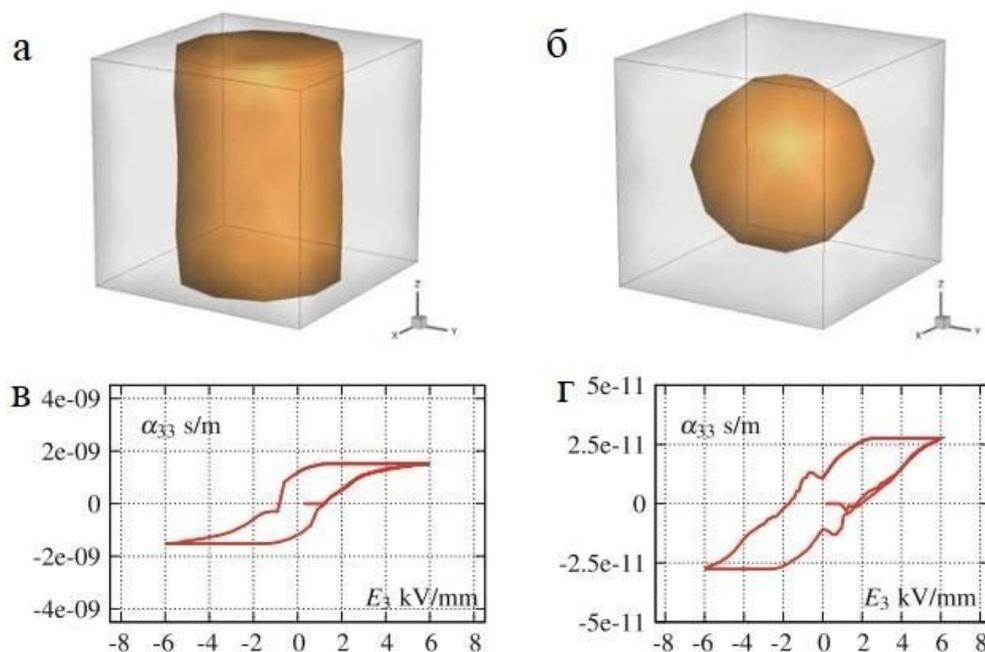


Рисунок 7. Коэффициент МЭЭ для материала с цилиндрическими ФМ включениями (а,в) и сферическими (б,г) [9].

Авторами выделяются два основных отличия: магнитоэлектрический отклик достигает насыщения при различной величине напряженности внешнего электрического поля и максимальная величина этого отклика во много раз меньше у сферических частиц.

Выбор теоретической модели является определяющим фактором в численном моделировании. В данный момент существует некоторое количество различных моделей, разработанных для численного моделирования магнитных эластомеров. В работе [14] проводится подробный анализ и сравнение девяти моделей МЭ, схемы некоторых из них изображены на рис. 8.

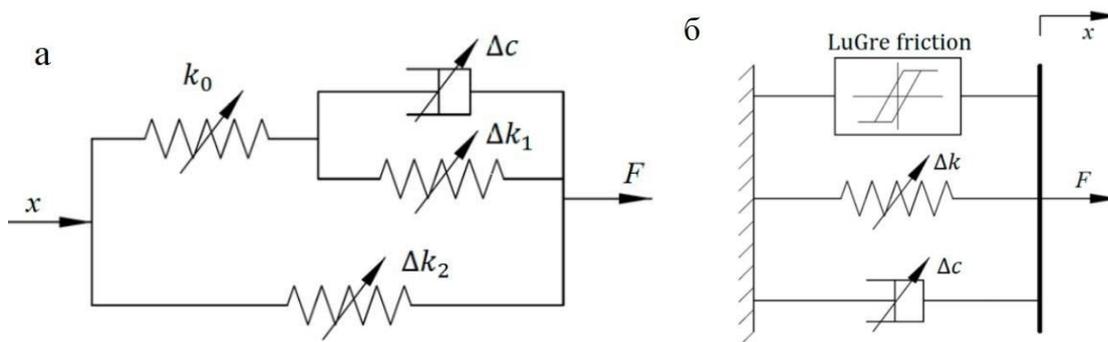


Рисунок 8. Схемы вязкоупругой модели с четырьмя параметрами (а) и модели Лунгре (б) [14].

Авторы пришли к выводу, что модель Лунгре имеет оптимальные показатели и точнее других, рассмотренных в этом исследовании моделей, соответствует экспериментальным данным. Подобные модели рассчитаны на приложение периодического внешнего механического давления к образцу, для чего в них предусмотрены различные механизмы, описывающие деформации.

В исследовании [9] показаны результаты моделирования на основе трехмерной модели Прейзаха. Однако в этой же работе авторы отмечают сложность подобных вычислений, которая требует немалых вычислительных мощностей и/или времени.

Целью данной работы было провести численное моделирование магнитоэлектрического эффекта в композите на основе магнитного эластомера с добавлением сегнетоэлектрических частиц. Была поставлена следующая задача: на основе результатов этого моделирования определить взаимное влияние электрических и магнитных полей на магнитные и электрические свойства композита на основе магнитного эластомера.

Глава 2. Методы

Для решения поставленной задачи необходимо было построить модель мультиферроидного композита на основе магнитного эластомера (МЭ). В рамках этой модели требовалось определить механизмы полевого взаимодействия СЭ и ФМ частиц друг с другом, с внешним электрическим и магнитным полем, а также упругих связей частиц наполнителя, осуществляемых через взаимодействие с полимерной матрицей.

Для моделирования перераспределения частиц в полимерной матрице был выбран метод молекулярной динамики. Поведение материала описывалось движением и взаимодействием друг с другом сферических виртуальных частиц трех типов: ферромагнитных (ФМ — с собственным магнитным моментом), сегнетоэлектрических (СЭ — с собственным электрическим дипольным моментом) и частицами эластомера.

Взаимодействие ФМ (СЭ) частиц друг с другом рассматривалось в диполь-дипольном приближении, а взаимодействие частиц с полимерной матрицей описывалось методом виртуальных пружин (Рис. 9) [15, 6].

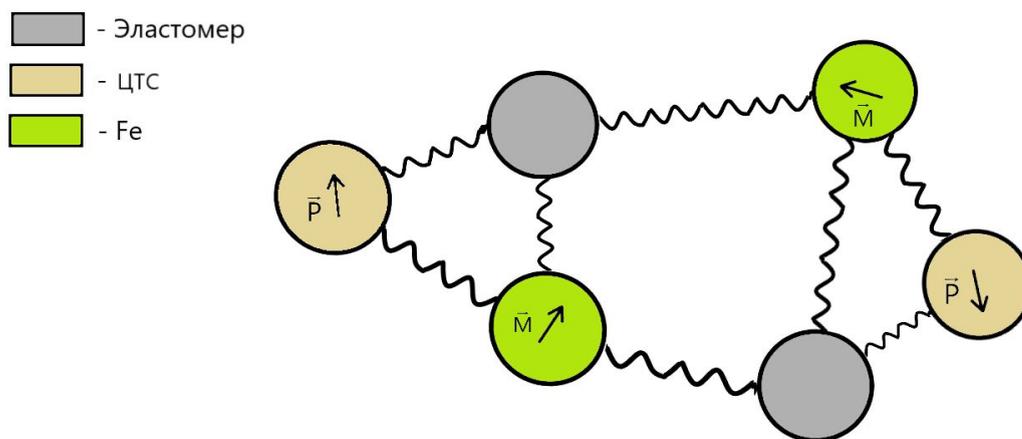


Рисунок 9. Иллюстрация метода виртуальных пружин, реализованного для частиц трех типов.

В качестве коэффициента упругости использовался модуль Юнга полимерной матрицы. Уравнения движения интегрировались при помощи метода Верле [16], в каждой последующей итерации рассчитывалось новое положение каждой частицы:

$$r_{i+1} = 2r_i - r_{i-1} + \frac{1}{m}F_i h^2 + O(h^4), \quad (1)$$

где $r(t)$, m, F, h — координата и масса частицы, равнодействующая всех сил, действующих на частицу, и шаг по времени соответственно. В каждой следующей итерации позиция частицы зависит от ее положения в двух предыдущих итерациях и не зависит от скорости частицы. Равнодействующая всех сил, действующих на магнитную частицу, описывалась формулой:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{магн}} + \vec{F}_{\text{упр}} = \nabla \vec{H}_{\text{бс}} \vec{m} + 4\pi E \frac{r^2}{l} \delta l. \quad (2)$$

Здесь $\vec{H}_{\text{бс}}$, E , l , δl — поле ближайших соседей (магнитных частиц), модуль Юнга, длина и изменение длины пружины, r — радиус частицы. Эффективное поле, действующее на магнитную частицу, складывается из поля ближайших соседей и однородного внешнего поля. В начале каждой итерации магнитные моменты частиц ориентировались вдоль эффективного поля. Градиент однородного внешнего поля равен нулю, из-за чего его напряженность не используется в расчете равнодействующей силы. Ближайшие соседи для каждой частицы определялись исходя из ее радиуса: если расстояние до частицы не превышало 6 радиусов, ее дипольный момент учитывался в расчете $\vec{H}_{\text{бс}}$. Таким образом, формула для расчета поля ближайших соседей имеет вид:

$$\vec{H}_{\text{бс}} = \sum_{k=1}^N \vec{H}_k = \sum_{k=1}^N \frac{3(\vec{m}^k \vec{R}_k) \vec{R}_k - R_k^2 \vec{m}^k}{R_k^5}, \quad (3)$$

где \vec{m}^k — магнитный момент k -ой соседней частицы, а \vec{R}_k — расстояние от рассматриваемой частицы до ее k -го соседа. Формулы 2 и 3 аналогично

записываются в случае взаимодействия СЭ частиц: напряженность магнитного поля и магнитный дипольный момент заменяются напряженностью электрического поля и электрическим дипольным моментом. Представленная модель может быть использована в дальнейшем изучении подобных материалов.

Глава 3. Результаты

Было проведено моделирование свойств системы, параметры которой приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры моделируемой системы.

Тип частиц	Плотность, г/см ³	Объемная доля частиц, %	Намагниченность/поляризация насыщения, ед. СГС	Количество частиц
Эластомер	1.003	6	—	1824
Fe	7.874	6	1735	672
ЦТС	4.7	15	100000	2232

Входными данными задавались концентрации каждого вида частиц, средний радиус частиц (общий) — 2,5 мкм, объем образца 200 × 200 × 50 мкм. Характеристики вещества ФМ частиц приняты близкими к соответствующим для железа, для моделирования СЭ частиц использовались параметры ЦТС. Модуль Юнга матрицы был принят равным 1 кПа. Все внешние поля прикладывались вдоль оси OZ.

Для вышеописанной системы были построены петли ферромагнитного и сегнетоэлектрического гистерезиса (рис. 10). Коэрцитивная сила H_c имеет значение в диапазоне от 50 до 100 Э (рис. 10б), E_c принимает значения в диапазоне от 2000 до 4000 ед. СГС (рис. 10г), что качественно согласуется с аналогичными экспериментальными данными [11, 17, 18]. Количественное расхождение может быть связано с различием в параметрах исследуемых образцов.

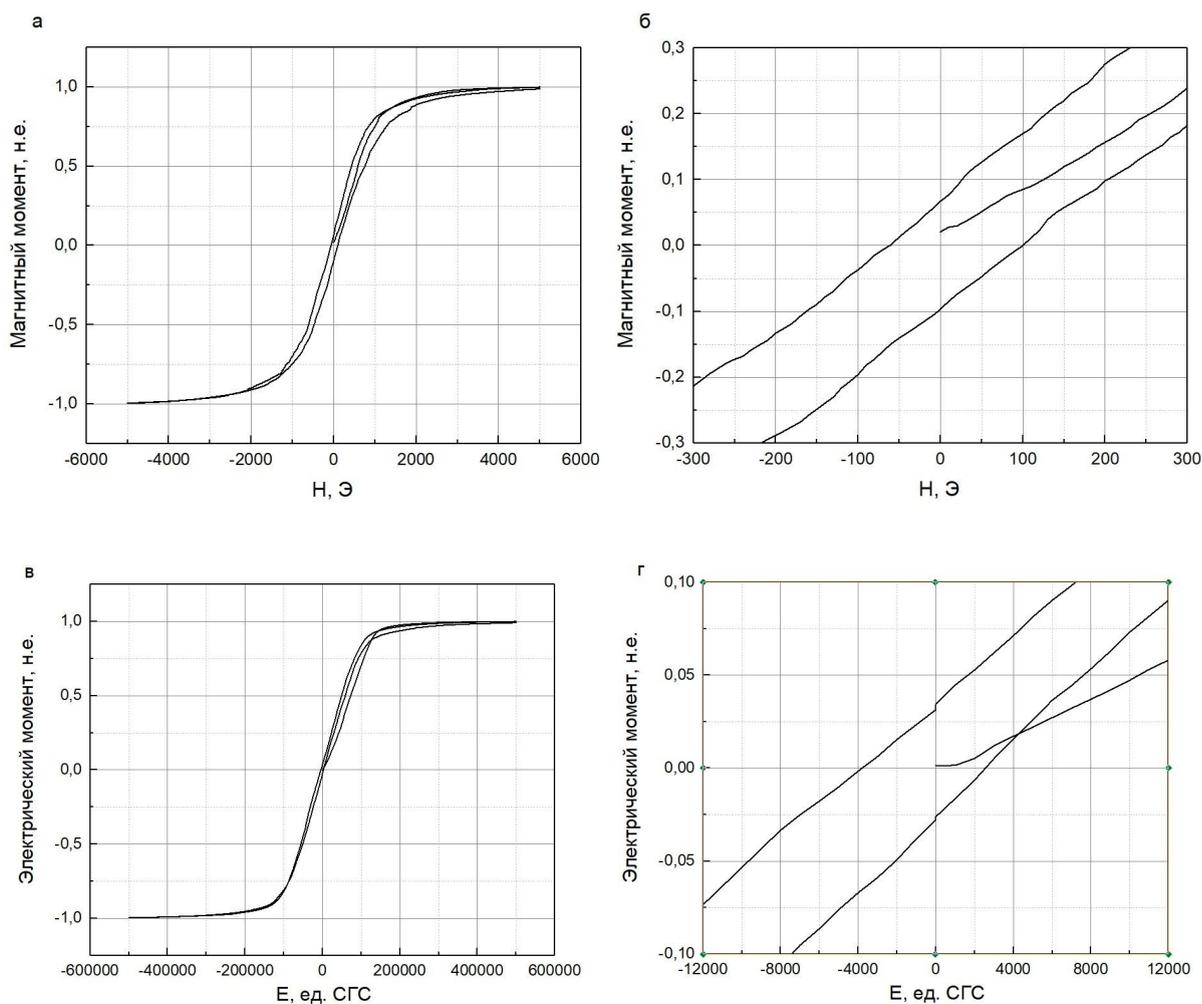


Рисунок 10. Петля ферромагнитного гистерезиса (а) и ее центральная секция (б); петля сегнетоэлектрического гистерезиса (в) и ее центральная секция (г).

Разница абсолютных значений коэрцитивной силы при изменении знака напряженности приложенного поля может быть связана с изначальным наличием ненулевой намагниченности (поляризации) у образца.

Для системы с одной частицей коэрцитивная сила отсутствует. Ненулевая коэрцитивная сила возникает в системе многих частиц и обусловлена их взаимодействием. В рамках данной модели частицы с магнитным (электрическим) моментом испытывают воздействие поля ближайших соседей и силы упругости, возникающей при деформации

виртуальных пружин. Этот результат позволяет сделать вывод о применимости данной модели к описанию процесса гистерезиса в МЭ. То есть наличие упругих связей между ФМ частицами в виде виртуальных пружин приводит к приемлемому описанию материала.

Для такой же системы были получены кривые намагничивания и поляризации для разных значений напряженности внешнего постоянного электрического и магнитного поля, соответственно. Стоит отметить, что для удобства на графиках были построены зависимости для относительной величины магнитного (электрического) момента образца, однако качественно они полностью совпадают с аналогичными зависимостями для намагниченности (поляризации), поэтому здесь и далее для анализа полевых зависимостей будут использоваться эти обозначения. На полученных графиках (рис. 11) наблюдается изменение хода кривых в зависимости от величины внешнего постоянного поля: чем больше напряженность внешнего электрического поля, тем в бóльших магнитных полях будет наблюдаться насыщение образца (рис. 11а). Аналогично можно описать зависимость хода кривой поляризации от внешнего магнитного поля (рис. 11б).

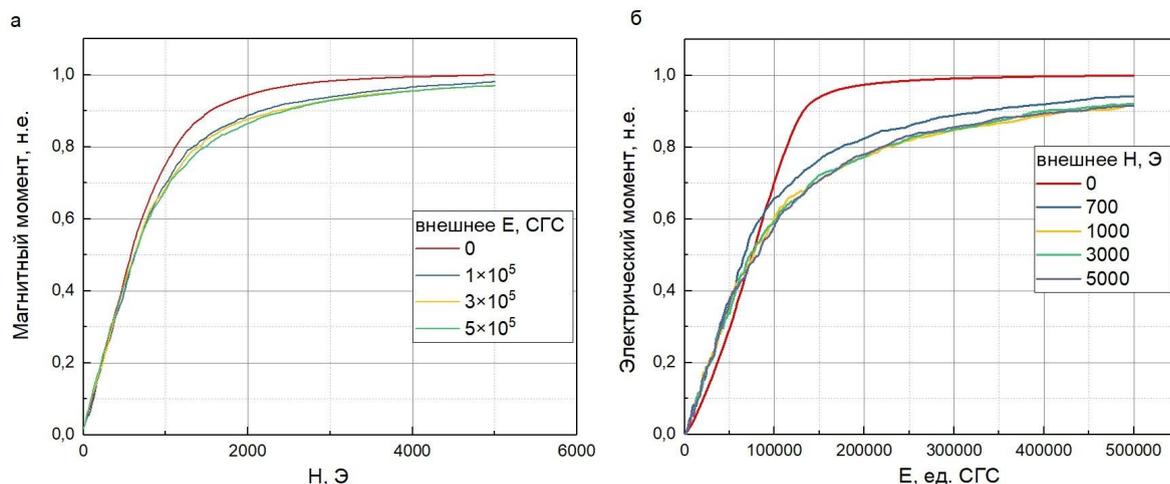


Рисунок 11. Кривые намагничивания в зависимости от прикладываемого внешнего электрического поля (а); кривые поляризации в зависимости от прикладываемого внешнего магнитного поля (б).

Более наглядно эту зависимость можно проиллюстрировать, если вычестить из кривых намагничивания (поляризации) в присутствии электрического (магнитного) поля кривую в нулевом электрическом (магнитном) поле (рис. 12).

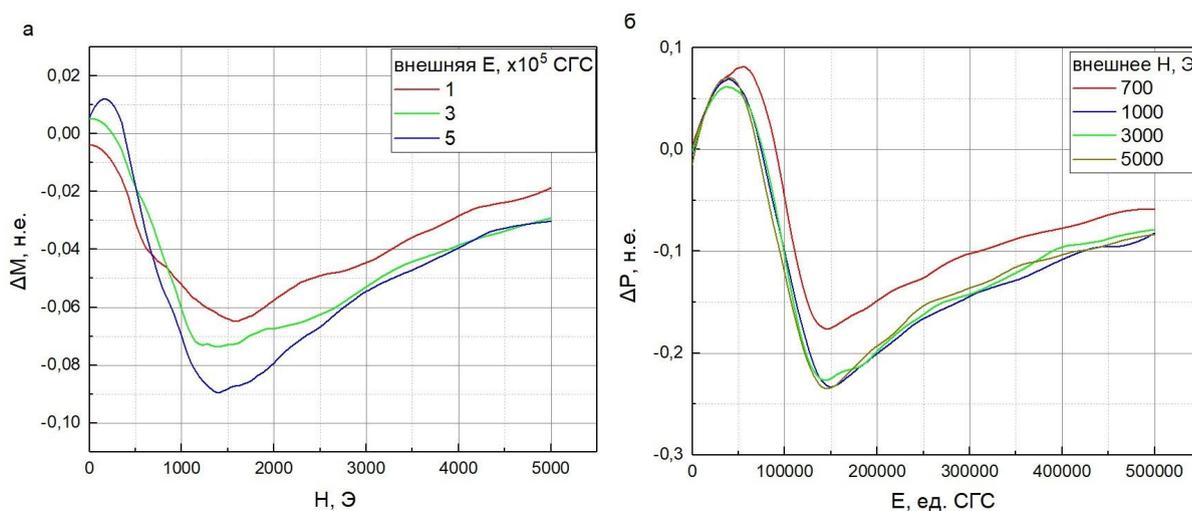


Рисунок 12. Изменение намагниченности (а), поляризации (б).

Разности кривых (рис. 12) имеют преимущественно отрицательный знак, что соответствует более высокому ходу кривой намагничивания (поляризации) в нулевом внешнем электрическом (магнитном) поле.

Кроме того, кривые имеют ярко выраженный минимум, по смещению которого можно также судить о наличии как прямого, так и обратного МЭЭ (табл. 2).

Таблица 2. Положения минимума графиков разности поляризации ΔP и намагниченности ΔM при приложении внешнего магнитного $H_{\text{внеш}}$ и электрического $E_{\text{внеш}}$ полей, соответственно. H_{min} , E_{min} — величина поля, при котором достигается экстремум.

Изменение намагниченности				Изменение поляризации				
$E_{\text{внеш}}, \times 10^5 \text{ ед. СГС}$	1	3	5	$H_{\text{внеш}}, \text{ Э}$	700	1000	3000	5000
$H_{\text{min}}, \text{ Э}$	1590	1400	1390	$E_{\text{min}}, \times 10^5 \text{ ед. СГС}$	1,44	1,51	1,41	1,46
$ \Delta M , \text{ н.е.}$	0,065	0,074	0,09	$ \Delta P , \text{ н.е.}$	0,176	0,232	0,227	0,235

По данным из таблицы 2 можно сделать вывод, что значение минимума разности кривых намагничивания ΔM увеличивается по модулю с увеличением внешнего электрического поля, а значение поля H_{min} , в котором достигается минимум, уменьшается. Этот результат можно связать с возникновением дополнительной анизотропии в образце, связанной с упорядочиванием СЭ частиц во внешнем электрическом поле, из-за которой затрудняется процесс намагничивания образца. При этом значение модуля разности поляризации $|\Delta P|$ не испытывает значительных изменений при изменении напряженности внешнего магнитного поля в диапазоне от 1000 до 5000 Э.

Таким образом, было проведено численное моделирование мультиферроика на основе МЭ. Построенные петли ферромагнитного и сегнетоэлектрического гистерезиса имеют ненулевую коэрцитивность, чем подтверждают применимость вышеописанной модели для моделирования гистерезиса в МЭ. Кроме того, были показаны полевые зависимости кривых намагничивания и поляризации (обратный и прямой МЭЭ). Смещение ФМ частиц во внешнем магнитном поле посредством упругого взаимодействия вызывает смещение СЭ частиц и изменение поляризации образца. В обратном же эффекте смещение СЭ частиц во внешнем электрическом поле приводит к изменению намагниченности образца. Таким образом, полученные результаты согласуются с аналогичными экспериментальными данными [11, 17, 18].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- Разработана модель магнитного эластомера со смесью ферромагнитных и сегнетоэлектрических частиц;
- Результаты моделирования показывают наличие магнитоэлектрического преобразования: кривые намагничивания (поляризации) меняют свой ход при приложении внешнего электрического (магнитного) поля;
- Построенная модель на основе методов молекулярной динамики и виртуальных пружин позволяет описать магнитный (электрический) гистерезис образца;
- Результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными из литературы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Elhajjar, R., Law, C.-T., & Pegoretti, A. (2018). Magnetostrictive polymer composites: Recent advances in materials, structures and properties. *Progress in Materials Science*, 97, 204–229;
2. Boyraz P., Runge G., Raatz A.: An Overview of Novel Actuators for Soft Robotics. *Actuators* 2018, 7, 48.
3. G. Filipcsei, I Csetneki, A Szilágyi, M Zrínyi.: Magnetic Field-Responsive Smart Polymer Composites. *Adv Polym Sci* (2007); 206: P. 137–189.;
4. Testa P., Style R.W., Cui J., Donnelly C., Borisova E., Peter M. Derlet, Dufresne E.R., Heyderman L.J.: Magnetically Addressable Shape-Memory and Stiffening in a Composite Elastomer. *Adv. Mater.* 2019, 31, 1900561;
5. Abdul Aziz, S. A., Mazlan, S. A., Ubaidillah, U., Shabdin, M. K., Yunus, N. A., Nordin, N. A., Rosnan, R. M. (2019). Enhancement of Viscoelastic and Electrical Properties of Magnetorheological Elastomers with Nanosized Ni-Mg Cobalt-Ferrites as Fillers. *Materials*, 12(21), 3531.
6. Isaev, D; Semisalova, A; Alekhina, Yu; Makarova, L; Perov, N: Simulation of Magnetodielectric Effect in Magnetorheological Elastomers. *Int. J. Mol. Sci.* 2019, 20.
7. Snarskii, A.; Zorinets, D; Shamonin, M; Kalita, V: Theoretical method for calculation of effective properties of composite materials with reconfigurable microstructure: Electric and magnetic phenomena. *Physica A* 535 (2019) 122467.
8. Bibes, M., Barthélémy, A.: Multiferroics: towards a magnetoelectric memory. *Nature Mater.* 7(6), 425–426 (2008). ISSN 1476-1122.

9. Schröder, J.; Labusch, M.: A 3D Magnetostrictive Preisach Model for the Simulation of Magneto-Electric Composites on Multiple Scales. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics* 86, 2018, pp. 298-322.
10. Li, C., Xu, R., Gao, R., Wang, Z., Chen, G., Deng, X., Cai, W., Fu, C., Li, Q.: Structure, dielectric, piezoelectric, antiferroelectric and magnetic properties of $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ composite ceramics.
11. Makarova, L.A.; Alekhina, Yu.A.; Omelyanchik, A.S.; Rodionova, V.V.; Malyshkina, O.V.; Perov, N.S.: Elastically coupled ferromagnetic and ferroelectric microparticles: New multiferroic materials based on polymer, NdFeB and PZT particles. *JMMM* 2019, 470, c. 89-92.;
12. A.I. Stognij, N.N. Novitskiia, S.V. Trukhanova, A.V. Trukhanova, L.V. Paninab, S.A. Sharkoa, A.I. Serokurovaa, N.N. Poddubnayaa, V.A. Ketskod, V.P. Dyakonove, H. Szymczake, Charanjeet Singhg, Y. Yangh: Interface magnetoelectric effect in elastically linked Co/PZT/Co layered structures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 485 (2019) 291–296
13. Miehe, C.; Vallicotti, D; Teichtmeister, S.: Homogenization and multiscale stability analysis in finite magneto-electro-elasticity. Application to soft matter EE, ME and MEE composites. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 300 (2016) 294–346.;
14. Yang Yu, Jianchun Li, Yancheng Li, Shaoqi Li, Huan Li and Weiqiang Wang: Comparative Investigation of Phenomenological Modeling for Hysteresis Responses of Magnetorheological Elastomer Devices. *Int. J. Mol. Sci.* 2019, 20, 3216;
15. Sánchez, P.A.; Gundermann, T.; Dobroserdova, A.; Kantorovich, S.S.; Odenbach, S. Importance of matrix inelastic deformations in the initial response of magnetic elastomers. *Soft Matter* 2018, 14, 2170–2183.
16. Verlet, L. Computer "Experiments" on Classical Fluids. I. Thermodynamical Properties of Lennard-Jones Molecules. *Phys. Rev.* 1967, 159, c. 98–103.

17. Makarova Liudmila A., Alekhina Yuliya A., Rusakova Tatiana S., Perov Nikolai S.: Tunable properties of magnetoactive elastomers for biomedical applications. *Physics procedia*, 2016, 82.
18. Komlev A.S., Alekhina Yu A., Makaryin R.A., Malyshkina O.V., Makarova L.A., Perov N.S.: Magnetolectric properties of multicomponent elastomers. *5th Italian School on Magnetism Book of Abstracts 2020, том 1, тезисы*, с. 39-39.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность своему научному руководителю Людмиле Александровне Макаровой за оказанную поддержку и активнейшее содействие в написании этой работы.

Особенно благодарю Исаева Данилу Алексеевичу за огромную помощь в работе, ценные указания и советы.

Признательность и благодарность хочется выразить всем сотрудникам и студентам кафедры магнетизма Физического факультета МГУ и особенно заведующему кафедрой магнетизма профессору Перову Николаю Сергеевичу.