



ИММ УрО РАН • УрФУ • УдГУ
УРАЛЬСКИЙ
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ
ЦЕНТР



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук

БФУ

БАЛТИЙСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ИММАНИЛА КАНТА



Smart Materials &
Biomedical Applications
IKBFU Research and Education Center

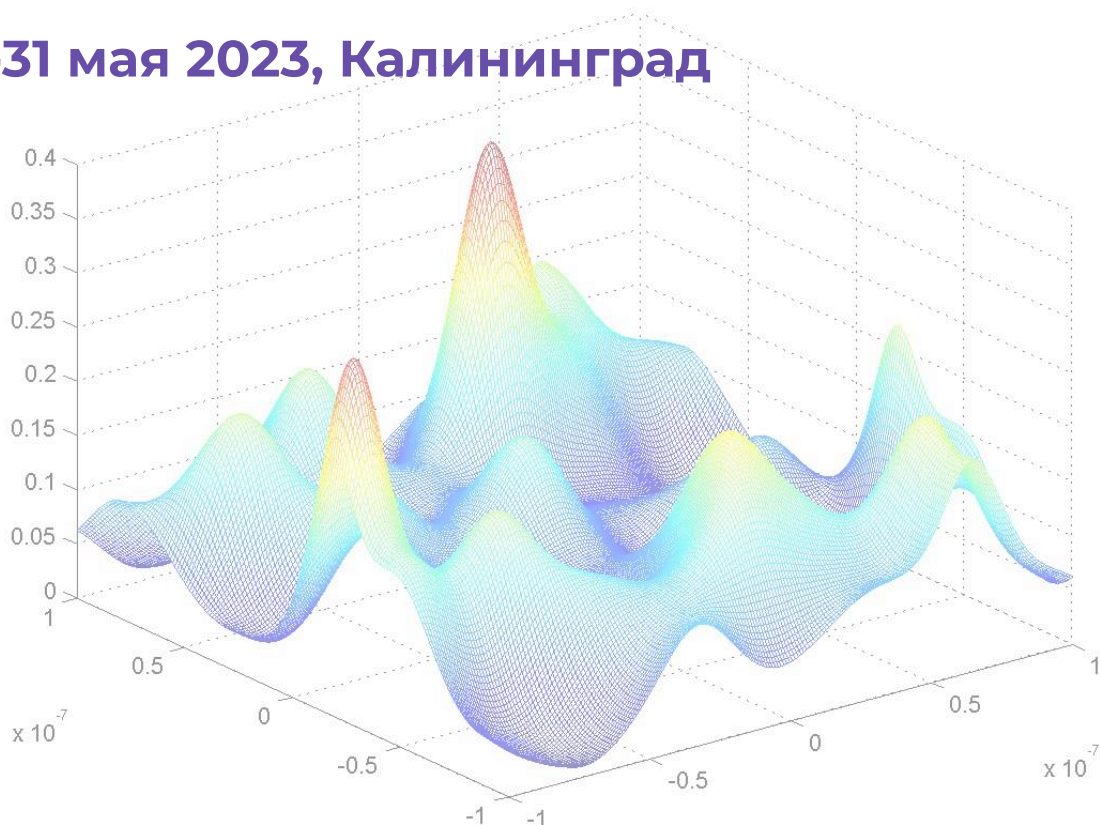


СКФУ • ВЦ РАН • СОГУ им. К.Л. Хетагурова
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ЦЕНТР
МАТЕМАТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

II Научный семинар «Математическое и компьютерное моделирование свойств мягких магнитных материалов: от теории к экспериментам и приложениям»

28-31 мая 2023, Калининград



Оглавление

Приглашенные доклады	3
Секционные доклады.....	10
Индекс авторов.....	42

Приглашенные доклады

Многофункциональные магнитоактивные материалы: от теории к практике

Алехина Ю.А.^{1,2}, Макарова Л.А.^{1,2}, Исаев Д.А.¹, Макарьин Р.А.¹,
Колесникова В.Г.^{1,2}, Родионова В.В.², Крамаренко Е.Ю.¹, Перов Н.С.^{1,2}

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения» БФУ имени И. Канта, Калининград, Россия

Электронная почта ответственного автора: ya.alekhina@physics.msu.ru

Будучи предметом исследований ученых-физиков и инженеров по всему миру вот уже несколько десятилетий, магнитореологические материалы открыли множество возможностей для усовершенствования различных устройств, а также сделали возможным создание принципиально новых устройств. За почти 75 лет со времен первых публикаций, посвященным магнитореологическим жидкостям [1], количество опубликованных международных патентов на устройства и материалы, использующие их, превышает сотни тысяч (по данным Google.patents). Магнитореологические эластомеры, появившиеся в России на стыке тысячелетий в результате совместной работы в МГУ и ГНИИХТЭОС, а также параллельно исследуемые в Японии и Венгрии [2], также спровоцировали взрыв исследовательской активности в теоретической и прикладной областях, а во множестве устройств пришли на смену жидким аналогам.

Магнитореологические материалы демонстрируют ряд свойств, наделяющих их особой функциональностью. Так, магнитореологический, магнитодеформационный эффект, эффект памяти формы, а также особые электрические характеристики этих материалов имеют огромное практическое значение для огромного ряда устройств, а также приковали интерес исследователей-теоретиков. Для описания магнитодеформационных и магнитореологических характеристик были предложены многочисленные теоретические модели и подходы [3-4]. В работе [5] теоретически описаны поверхностные магнитомеханические характеристики эластомеров. В работе [6] рассматривались методики описания и интерпретации данных о зависимости диэлектрической проницаемости магнитных эластомеров от магнитного поля. Большое внимание уделяется моделированию удерживания магнитных компонент в потоке жидкости [7]. Развитие получили теоретические исследования свойств многокомпонентных реологических материалов [8]. Получаемые теоретически результаты имеют огромное значение для предсказания свойств материалов и выбора оптимальных компонент для практического использования. В докладе приводятся демонстрации приложения полученных результатов в разнообразных областях от актюаторов и абсорберов до медицинских устройств и средств доставки лекарств.

- [1] J. Rabinow *Electrical Engineering*, 67 (1948), 1308-1315;
- [2] E. Yu. Kramarenko et al., *INEOS OPEN*, 2 (2019), 178–184;
- [3] O.V. Stolbov et al. *Soft Matter*, 7 (2011), 8484–8487.
- [4] D. Romeis et al. *Soft Matter*, 16 (2020), 9047-9058;
- [5] T.A. Nadzharyan et al. *Soft Matter*, 15 (2019), 9507-9519;
- [6] D.A. Isaev et al. *Int. J. of Molec. Sci.*, 20 (2019) 1457;
- [7] I. Novikau et al, *J. of Mol. Liq.*, 346 (2022), 118056;
- [8] L.A. Makarova et al. *Polymers*, 14 (2022), 153;

Одномерные магнитоплазмонные кристаллы на основе железа и никеля для топографирования магнитных полей

Беляев В.К.¹, Мурзин Д.В.¹, Грунин А.А.², Федянин А.А.², Родионова В.В.¹

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236041, Россия, Калининград, ул. Невского, д. 14

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

Электронная почта ответственного автора: belyaev@lnmm.ru

Одними из активно исследуемых объектов, подходящих для замены существующих слабо чувствительных сенсорных элементов датчиков магнитных полей на основе магнитооптических эффектов являются магнитоплазмонные кристаллы (МПЛК) [1,2]. МПЛК представляют собой периодически наноструктурированные многослойные структуры, состоящие из комбинированных магнитных и плазмонных материалов [3]. Ключевой особенностью МПЛК является возможность усиления наблюдаемых магнитооптических эффектов на 2 порядка по сравнению с не наноструктурированными многослойными структурами того же состава.

Данная работа посвящена применению разработанных датчиков магнитного поля на основе МПЛК, состоящих из железа и никеля, для картирования магнитных полей, создаваемых экспериментальными объектами, такими как провод током, планарная индукционная катушка и сложная система постоянных магнитов. Пример геометрии детектирования магнитных полей, измеренной полевой зависимости магнитооптического отклика, определяющей чувствительность и рабочий диапазон датчика, а также карты распределения магнитного поля, создаваемого проводом с током, показаны на Рисунке 1.

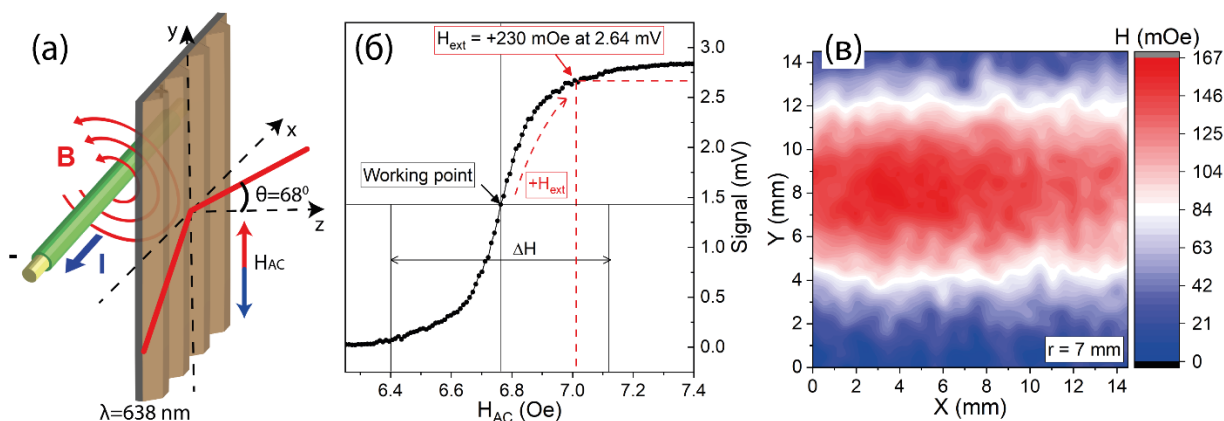


Рисунок 1 – Схематическое изображение экспериментальной геометрии для картирования (а), измеренная полевая зависимость для образца МПЛК на основе 5 нм пермаллоя (б) и пример построенной карты распределения магнитного поля, создаваемого проводом с током на расстоянии 7 мм от образца МПЛК.

Исследование поддержано Министерством Науки и Высшего Образования Российской Федерации № 13.2251.21.0143.

- [1] G.A. Knyazev, ACS Photonics, 5 (2018), 4951-4959;
- [2] V.K. Belyaev, Sci. Rep., 10 (2020), 1-6;
- [3] V.I. Belotelov, Nat. Nanotechnol. 6 (2011), 370–376.

Концепция "модифицированного среднего поля" в математическом моделировании свойств феррожидкостей и феррокомпозитов

Иванов А.О.¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
Alexey.Ivanov@urfu.ru

Концепция «модифицированного среднего поля» (МСП) была впервые предложена [1] для учета межчастичного диполь-дипольного взаимодействия магнитных моментов феррочастиц в феррожидкостях. Основная идея заключается в том, что на магнитный момент каждой, случайно выбранной, феррочастицы действует не только внешнее магнитное поле, но и суммарное магнитное поле, создаваемое всеми остальными феррочастицами. Для расчета последнего была разработана достаточно сложная статистико-механическая процедура, основанная на решении уравнения, связывающего одночастичную и парную функции распределения феррочастиц [1], и на разложении парной функции распределения в ряд по концентрации феррочастиц и по интенсивности магнито-дипольного взаимодействия. В рамках подхода МСП были получены выражения для равновесной намагниченности полидисперсной феррожидкости и статической начальной магнитной восприимчивости [1-3], весьма точно описывающие экспериментальные данные и данные компьютерного моделирования. На базе этих выражений был разработан алгоритм решения обратной задачи магнитной гранулометрии, позволяющий получить распределение феррочастиц по размерам.

Метод МСП был модифицирован [4] для учета межчастичного взаимодействия при решении задачи Фоккера-Планка-Брауна, описывающей динамический магнитный отклик феррожидкостей. Впервые было получено выражение для динамической начальной магнитной восприимчивости полидисперсных феррожидкостей, обобщающее известную формулу Дебая на случай взаимодействующих феррочастиц. Предсказания МСП о влиянии межчастичного взаимодействия на частотный спектр динамической восприимчивости был полностью подтвержден данными компьютерного моделирования [5]. Метод МСП показал также свою высокую эффективность при расчете статических магнитных свойств феррокомпозитов [6], в которых взаимодействующие суперпарамагнитные феррочастицы обездвижены в жесткой матрице. Последние годы метод МСП активно используется при математическом моделировании динамических магнитных свойств феррокомпозитов.

Работа выполнена в рамках плана научных исследований Уральского математического центра УрФУ, Соглашение с Минобрнауки России № 075-02-2023-935.

- [1] A.O. Ivanov, O.B. Kuznetsova, *Physical Review E*, 64 (2001) 041405;
- [2] А.О. Иванов, О.Б. Кузнецова, *Коллоидный журнал*, 68 (2006) 472;
- [3] A.O. Ivanov, S.S. Kantorovich, E.N. Reznikov, et. al., *Physical Review E*, 75 (2007) 061405;
- [4] A.O. Ivanov, V.S. Zverev, S.S. Kantorovich, *Soft Matter*, 12 (2016) 3507;
- [5] J.O. Sindt, P.J. Camp, S.S. Kantorovich, E.A. Elfimova, A.O. Ivanov, *Physical Review E*, 93 (2016) 063117;
- [6] E.A. Elfimova, A.O. Ivanov, P.J. Camp, *Nanoscale*, 11 (2019) 21834.

Тензор магнитной проницаемости вблизи критического поведения намагниченности, индуцированного магнитным полем.

Панина Л.В.

Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Россия
Электронная почта ответственного автора: drlpanina@gmail.com

Многие приложения магнитных материалов часто связаны с высокой чувствительностью магнитных систем вблизи спин-ориентационных фазовых переходов. В случае индуцированных полем переходов магнитная проницаемость, как функция поперечного магнитного поля, проявляет характерные особенности при приближении к ориентационному переходу.

Для однодоменных частиц изменение намагниченности может происходить только за счет однородного вращения вектора намагниченности. При воздействии непрерывно меняющегося поля равновесная намагниченность может изменяться скачкообразно при определенных критических значениях поля. Характер кривых намагничивания зависит от типа магнитной анизотропии и ориентации «легких осей» по отношению к полю. Тензор магнитной проницаемости рассчитывается из линеаризованного уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта (ЛЛГ), которое описывает эволюцию намагниченности. Решение производится относительно равновесной намагниченности, и поведение магнитной проницаемости отражает ее скачки.

Магнестрикционные и магнитодеформационные полимерные пьезокомпозиты. Подходы к математическому моделированию

Райхер Ю.Л.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред, Российская академия наук, Уральское отделение,
Пермский федеральный исследовательский центр, Пермь

²Балтийский федеральный университет им. И.Канта, Калининград
Электронная почта ответственного автора: yuriy.raikher@gmail.com

Рассмотрены главные физические принципы функционирования современных композитных магнитопьезоэлектриков (МПЭ) на полимерной основе – систем, имеющих чрезвычайно широкий спектр применения. Конкретный предмет обсуждения – прямой магнитоэлектрический эффект, когда электрическая поляризация P полимерной матрицы возникает в ответ на приложенное магнитное поле H . Медиатором эффекта являются механические напряжения, создаваемые частицами ферромагнитного наполнителя, которые воздействуют на матрицу из полимерного пьезоэлектрика или – через упругую электронейтральную матрицу – на пьезоэлектрическую фазу наполнителя.

По способу генерации напряжений все указанные смарт-материалы можно разделить на два больших класса. В стрикционном композите (с-МПЭ) появление P обусловлено магнитной стрикцией феррочастиц в то время, как в деформационном магнитопьезоэлектрике (д-МПЭ) механические напряжения, генерирующие P , возникают в результате перемещений/вращений феррочастиц относительно матрицы без изменения их формы. Эти пути возбуждения магнитоэлектрического эффекта независимы, поэтому в реальных материалах всегда присутствует их комбинация.

Различия в механизмах генерации электрического отклика определяют различия и в условиях функционирования МПЭ. Так, для работы с-МПЭ всегда необходимо сочетание двух магнитных полей: сильного постоянного и слабого переменного. Для функционирования д-МПЭ требуется только одно, не слишком сильное, поле, частота которого произвольна.

Базовым подходом к моделированию с-МПЭ является континуальное приближение, известно много успешных примеров его применения. Однако для д-МПЭ этот подход малопригоден, поскольку их магнитоэлектрическая восприимчивость существенно зависит от локального пространственного распределения частиц внутри матрицы. Рассчитывать на достоверное описание таких композитов можно только при использовании мезоскопического рассмотрения. Этот путь предполагает выбор подходящего представительного объёма и затем расчёт (методом конечных элементов) его намагничивания и вызванного последним механического и электрического откликов. Примечательно, что и для с-МПЭ мезоскопический подход даёт очень хорошие результаты.

Финансовая поддержка работы – грант РФФИ №21-72-30032.

Моделирование магнитоэлектрического эффекта в композитах

Столбов О.В.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред, Российская академия наук, Уральское отделение,
Пермский федеральный исследовательский центр, Пермь

²Балтийский федеральный университет им. И.Канта, Калининград
sov@icmm.ru

Магнитопьезоэлектрики (МПЭ) – современные смарт композиты на полимерной основе, имеющие чрезвычайно широкий спектр применения. В данной работе изучается прямой магнитоэлектрический эффект, когда электрическая поляризация \mathbf{P} полимерной матрицы возникает в ответ на приложенное магнитное поле \mathbf{H}_0 . Данный эффект возникает при передаче механических напряжений, создаваемых частицами магнитного наполнителя на матрицу из полимерного пьезоэлектрика.

Рассматривается расчетная область Ω . Она состоит из подобласти Ω_p , занимаемой полимерной матрицей, обладающей свойствами пьезоэлектрика (PVDF), области Ω_m , занимаемой магнитными частицами, и пространства вокруг Ω_s . Вводятся три термодинамические переменные, задающие состояние системы: поле перемещений \mathbf{u} , скалярный магнитный потенциал ψ и скалярный электрический потенциал φ .

Для каждой из подобластей записываются плотности энергий: упругой, магнитной и электрической, которые интегрируются по этим областям. Записывается общая энергия системы в виде функционала, зависящего от градиентов переменных \mathbf{u} , ψ , φ :

$$U = \int_{\Omega_p} \rho \phi_p(\mathbf{F}, \nabla\varphi) dV + \int_{\Omega_m} \rho \phi_m(\mathbf{F}, \nabla\psi) dV - \frac{1}{8\pi} \int_{\Omega} (\mathbf{H}_0 - \mathbf{F}^{-T} \cdot \nabla\psi)^2 dV - \frac{1}{8\pi} \int_{\Omega} (\mathbf{F}^{-T} \cdot \nabla\varphi)^2 dV,$$

где ρ – плотность материала, $\mathbf{F} = \mathbf{I} + \nabla\mathbf{u}^T$ – градиент места, \mathbf{I} – единичный тензор второго ранга, $\phi_p(\mathbf{F}, \nabla\varphi)$ – плотность электроупругой энергии пьезоэлектрика, $\phi_m(\mathbf{F}, \nabla\psi)$ – плотность магнитоупругой энергии магнитных частиц. Для нахождения решения, т.е. распределение переменных \mathbf{u} , ψ , φ при заданном приложенном магнитном поле \mathbf{H}_0 , необходимо найти экстремум функционала U с заданными граничными условиями. Эта процедура реализована методом конечных элементов на языке python с использованием библиотеки FEniCSx.

Выполнена серия расчётов с различными распределениями частиц, проанализировано распределение электрического поля, возникающего вокруг МПЭ, при заданных конфигурациях магнитного поля и направления полинга пьезоэлектрика.

Финансовая поддержка работы – грант РФФИ №21-72-30032.

Секционные доклады

Математическое моделирование динамического отклика обездвиженных взаимодействующих дипольных частиц в переменном и постоянном магнитных полях

Амбаров А.В.¹, Елфимова Е.А.¹, Зверев В.С.¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

Электронная почта ответственного автора: alexander.ambarov@urfu.ru

Внедрение магнитных наночастиц в полимерную матрицу позволяет управлять свойствами композитного материала с помощью внешнего магнитного поля. Такие материалы вызывают значительный интерес у исследователей, медиков и инженеров, поскольку они активно используются в промышленных и биомедицинских технологиях.

В работе численно исследуется динамический отклик ансамбля взаимодействующих феррочастиц, находящихся в линейно поляризованном переменном и постоянном магнитных полях. Предполагается, что релаксация магнитных моментов феррочастиц происходит по неелевскому механизму, оси легкого намагничивания всех частиц сонаправлены и параллельны магнитным полям.

Вращательное движение магнитного момента случайной феррочастицы определяется из решения уравнения Фоккера-Планка, в которое вводится дополнительное слагаемое, позволяющее учесть межчастичные диполь-дипольные взаимодействия на уровне модифицированной теории среднего поля первого порядка [1]. Полученные решения для плотности вероятности ориентации магнитного момента случайной частицы используются для определения динамической восприимчивости. Численное решение уравнения Фоккера-Планка основано на безусловно устойчивой схеме для задач конвекции-диффузии [2].

Численно исследованы намагниченность, восприимчивость и время релаксации. Показано, что увеличение амплитуды переменного поля существенно ускоряет релаксационные процессы в рассматриваемой системе, а увеличение магнитной анизотропии частицы и межчастичных диполь-дипольных взаимодействий замедляет их. Численные результаты сравниваются с аналитическими решениями [3], надежными в слабом переменном поле, и получается превосходное согласие.

Таким образом, полученные результаты являются важной информацией для проектирования и синтеза новых функциональных материалов.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 075-02-2023-935 по развитию регионального научно-образовательного математического центра "Уральский математический центр").

[1] A.O. Ivanov, V.S. Zverev, S.S. Kantorovich, *Soft Matter*, 12(15), 3507-3513 (2016);

[2] Afanasyeva N.M., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., *Russian Mathematics*, 57, 1 (2013)

[3] A.V. Ambarov, V.S. Zverev, E.A. Elfimova, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 497 (2020) 166010.

Интенсификация термомагнитной конвекции в кольцевом зазоре однородным магнитным полем за счет оптимизации формы внутренней поверхности

Ананич А.Н., Краков М.С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь
aliinaananich@gmail.com

Конвекция в горизонтальном кольцевом зазоре является предметом интереса многих исследований из-за теоретического интереса и широкого инженерного применения, например, в кабельных системах передачи и охлаждении электронного оборудования. При использовании магнитной жидкости в качестве теплоносителя появляется дополнительная сила, которая позволяет увеличить теплопередачу. На данный момент исследована термомагнитная конвекция в зазоре с круговым и эллиптическим цилиндром внутри [1].

В работе рассматривается конвекция в горизонтальном кольцевом зазоре, заполненном магнитной жидкостью, при синусоидальной форме внутреннего цилиндра $R = R_{in} + A \sin(N * \varphi + \varphi_0)$. Внешнее однородное магнитное поле намагничивает внутренний цилиндр, выполненный из материала с высокой магнитной проницаемостью. Изучается возможность интенсификации конвекции за счет выбора формы внутреннего цилиндра.

Для решения уравнений конвективного движения в переменных функции тока – завихренности и магнитного поля использовался метод контрольных объемов на треугольной сетке.

Было установлено, что теплопередача может быть увеличена более чем в 3 раза для внутреннего цилиндра с тремя выступами по сравнению с гравитационной конвекцией при небольшом числе Рэлея (рис. 1а). Пример структуры течения под действием магнитного поля представлен на рисунке 1б.

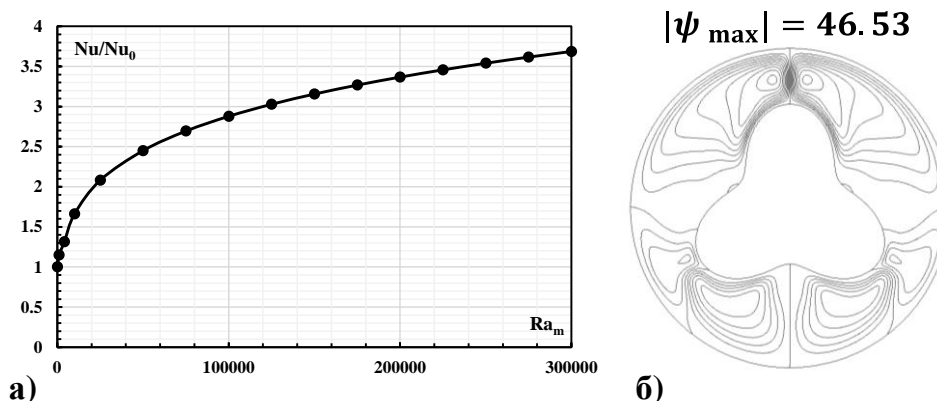


Рисунок 1 – Зависимость относительного числа Нуссельта от Ra_m (а) и линии тока под действием магнитного поля (б).

- [1] M.S. Krakov, I.V. Nikiforov, Influence of the shape of the inner boundary on thermomagnetic convection in the annulus between horizontal cylinders: Heat transfer enhancement, Int. J. Therm. Sci. 153 (2020), 106374, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106374>.

Композитные материалы на основе полимеров для тканевой инженерии

Антипова В. Н.¹, Соболев К. В.¹, Омельянчик А.С.¹, Воронцов С. А.¹, Левада Е.В.¹,
Родионова В.В.¹

¹*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия*
Электронная почта ответственного автора: valya.antipova@gmail.com

Средства восстановления механической функциональности поврежденных биологических тканей являются актуальной проблемой для практикующих врачей. Современные методы лечения таких повреждений тканей преимущественно сосредоточены на использовании трансплантатов тканей (ауто трансплантаты или аллотрансплантаты). Однако данные методики также сопряжены с риском развития серьезных осложнений, в следствие чего необходимы альтернативные методы восстановления биологических тканей [1].

Тканевая инженерия — это быстро развивающаяся область, целью которой является разработка специализированных 2D- или 3D-субстратов, способных стимулировать восстановление поврежденных тканей или замещающих поврежденные участки биологических тканей. Ключевой задачей при разработке таких субстратов является обеспечение максимального сходства механических свойств субстратов с нативной тканью человека. Развитие тканевой инженерии привело к появлению группы так называемых «биоматериалов», к которым относятся биосовместимые природные и синтетические полимеры, например поливинилиденфторид [1].

Поливинилиденфторид (PVDF) – фторопласт, обладающий хорошими механическими и пьезоэлектрическими свойствами (схожими со свойствами костной ткани). Однако, низкая поверхностная энергия PVDF негативно отражается на адгезивных свойствах полимера, что ограничивает его применение в биомедицинских приложениях [2]. Существуют различные методы модификации поверхности PVDF (химическое травление, дефторирование-сульфирование, плазменная обработка и др.), однако наиболее оптимальным с точки зрения биомедицинских приложений, является плазменная обработка [3].

Целью данной работы было исследование влияния композитных материалов на основе PVDF (модифицированных и не модифицированных плазмой) на адгезию и жизнеспособность мезенхимальных стволовых клеток человека. В ходе исследования было установлено, что обработка гелиевой плазмой улучшает адгезивные свойства подложек, что делает их интересными для различных биомедицинских приложений, например, в инженерии костной ткани.

Исследование выполнено при финансовой поддержке БФУ им. И. Канта в рамках научного проекта № 122041300142-6.

Список литературы:

- [1] A. Johnston, A. Callanan, Biomimetics, 8 (2023) 205;
- [2] D. Correia, J. Nunes-Pereira, D. Alikin et. al., Polymer, 2019;
- [3] M. Tavakoli, Surfaces and Interfaces for Biomaterials, 2005. P. 719-744

Равновесие намагничивающегося шара в капле магнитной жидкости в однородном наклонном магнитном поле

Согомонян К.Л.¹, Виноградова А.С.², Шарова О.А.^{1,2}, Пелевина Д.А.^{1,2}, Налетова В.А.²

¹Механико-математический факультет МГУ, Москва, Россия

²НИИ механики МГУ, Москва, Россия

vinogradova-as@mail.ru

Потенциал использования капель магнитной жидкости (МЖ) в качестве миниатюрных мягких магнитных роботов для ряда биомедицинских и микрофлюидных приложений изучается различными исследовательскими группами. Магнитные силы в сочетании с силой поверхностного натяжения позволяют манипулировать каплями МЖ с помощью внешнего магнитного поля. Системы электромагнитных катушек обычно используются для изменения как положения, так и формы капли с помощью градиента, направления и величины магнитного поля. Такие миниатюрные роботы, способные к контролируемому движению, могут также поглотить и переместить смачиваемые объекты или же толкать и манипулировать несмачиваемыми объектами [1]. В данной работе предлагается одновременное управление формой капли и положением погруженного в нее намагничивающегося тела (как смачиваемого, так и несмачиваемого) с помощью приложенного однородного магнитного поля.

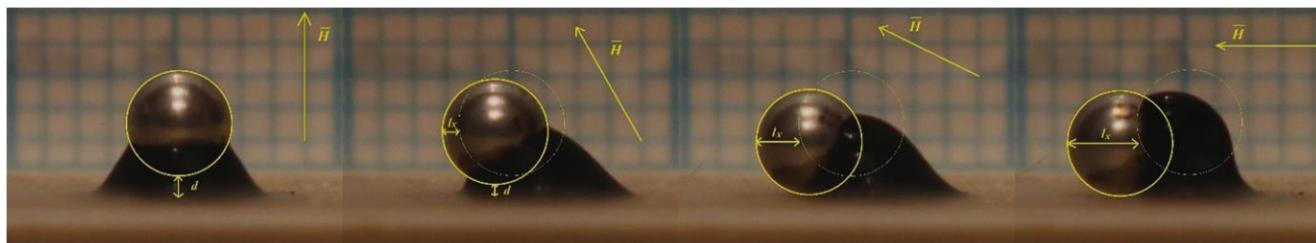


Рисунок 2 – Равновесные положения намагничивающегося шара в капле МЖ в однородном наклонном магнитном поле H при разных углах отклонения поля от вертикали

Экспериментально и теоретически исследовано равновесие намагничивающегося шара в капле МЖ на горизонтальной плоскости в однородном наклонном магнитном поле (Рис. 1). Сферическая форма тела выбрана для удобства расчетов в связи с известным выражением для магнитного поля от намагничивающегося в однородном приложенном поле шара, но в эксперименте рассматривались и тела других форм. В безындукционном приближении получено аналитическое выражение для силы, действующей на тело со стороны МЖ. Построены экспериментальные и теоретические зависимости высоты d левитации тела от объема капли МЖ при различных значениях модуля и наклона приложенного магнитного поля, а также от угла отклонения поля от вертикали. Высота левитации растет при увеличении объема МЖ, величины приложенного поля и при уменьшении угла отклонения поля от вертикали. Угол отклонения поля от вертикали, начиная с которого прекращается левитация тела в капле фиксированного объема при заданной величине магнитного поля, возрастает с объемом МЖ.

[1] R. Ahmed, M. Ilami, J. Bant, et al., *Soft Robotics*, 8 (2021) 687.

Компьютерное моделирование необратимых деформаций магнитных эластомеров с помощью молекулярной динамики

Пущина М.В.¹, Добросердова А.Б.¹, Канторович С.С.²

¹Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

²Университет г. Вена, г. Вена, Австрия

Электронная почта ответственного автора: Alla.Dobroserdova@urfu.ru

Магнитные эластомеры – это системы из магнитных частиц, которые распределены в немагнитной эластичной матрице. Магнитные частицы имеют размер от нескольких нанометров до нескольких микрометров, обладают собственными магнитными моментами. В рамках математического моделирования магнитный момент дипольных частиц может быть представлен в виде вектора, величина которого постоянна, а направление зависит от внутренней структуры частицы и направления внешнего магнитного поля. Такие системы могут быть взяты за основу для важного класса смарт-материалов, формой, механическим и реологическим поведением которых наряду с их физическими свойствами можно управлять внешним магнитным полем [1].

В качестве компьютерной модели магнитного эластомера выбрана следующая. Магнитные частицы моделируются как твердые дипольные сферы двух различных размеров, что позволяет учесть полидисперсность фракционного состава частиц. Упругие взаимодействия создаются с помощью классического гармонического потенциала. Для визуализации данного потенциала можно представить гармонические пружинки, удерживающие магнитные частицы. К каждой магнитной частице крепятся по две таких пружинки: один конец пружинки закреплен на самой частице в точке, являющейся проекцией конца или начала магнитного момента, а другой – в точке пространства, расположенной на прямой, на которой лежит вектор магнитного момента. Такое закрепление частицы позволяет ограничить не только ее перемещение, но также и вращение.

Для моделирования необратимых упругих деформаций, возникающих в процессе моделирования, используется метод сдвига точек крепления, описанный в работе [2], модифицированный для бидисперсной модели магнитного эластомера. Компьютерное моделирование планируется провести методом молекулярной динамики в программной среде ESPResSo [3].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-12-00209.

- [1] Filipcsei G. Magnetic Field-Responsive Smart Polymer Composites / G. Filipcsei // Oligomers – Polymer Composites – Molecular Imprinting / G. Filipcsei, I. Csetneki, A. Szilágyi, and M. Zrínyi. – Berlin, 2007. – PP. 137–189.
- [2] Sanchez P. A. Importance of matrix inelastic deformations in the initial response of magnetic elastomers / Sanchez P. A., Gundermann T., Dobroserdova A.B., Kantorovich S. S., Odenbach S. // Soft Matter – 2018. – № 14. – PP. 2170–2183.
- [3] Extensible Simulation Package for Research on Soft matter systems. – Mode of access <http://espressomd.org>.

Моделирование свойств многогранульных частиц, содержащих ограниченное число гранул: текстурирование и магнитный отклик

Елфимова Е.А., Иванов А.О., Соловьева А.Ю., Сокольский С.А.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Электронная почта ответственного автора: Ekaterina.Elifimova@urfu.ru

Магнитные наночастицы являются многообещающим инструментом для широкого спектра биомедицинских приложений, включая магнитоиндукционную гипертермию, синтез биосовместимых материалов, контрастные агенты для магнитно-резонансной томографии. Находясь *in vivo*, наночастицы могут поглощаться клетками. В результате, оказываясь в ограниченном объеме клетки, наночастицы частично или полностью теряют трансляционные и ориентационные степени свободы и образуют конгломерат, который представляет собой многогранульную частицу (МГЧ). Различное пространственное расположение наночастиц-гранул внутри МГЧ приводит к особенностям его реакции на магнитное поле, прогнозирование которых необходимо для развития высокотехнологичных биомедицинских методов диагностики, лечения и синтеза.

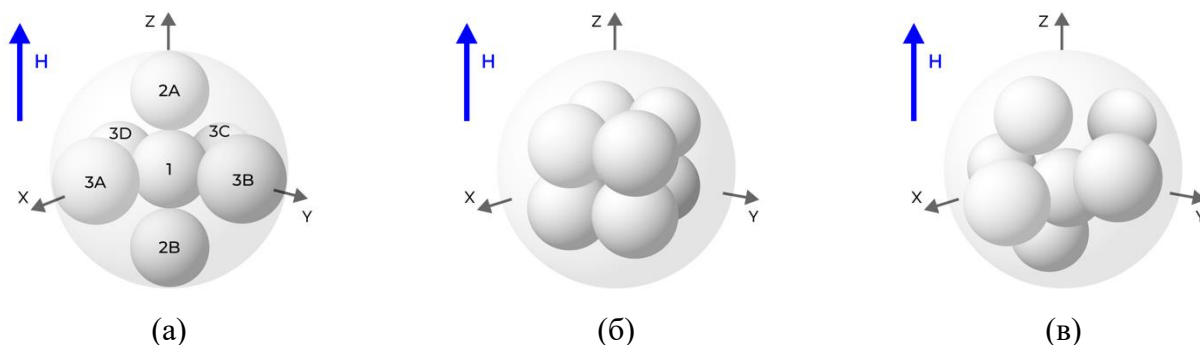


Рисунок 3 – Внутренняя структура изучаемых МГЧ. Модели (а) и (б) соответствуют плотной упаковке 7 и 8 наночастиц-гранул в правильную кубическую решетку; модель (в) представляет случайное расположение 7 наночастиц в МГЧ. Магнитное поле \mathbf{H} ориентировано вдоль оси Oz.

Особый интерес представляют МГЧ, содержащие ограниченное число гранул (не более 30). В таких МГЧ диполь-дипольные взаимодействия приводят к формированию ориентационного текстурирования магнитных моментов гранул, которое отличается от выстраивания магнитных моментов в сплошной среде, находящихся в тех же условиях. В представленной работе мы моделируем МГЧ ансамблями 7 и 8 гранул, которые расположены случайно или в узлах правильной кубической решетки (Рисунок 1). Предполагается, что гранулы обездвижены, а магнитные моменты безбарьерно вращаются внутри гранул. Исследуется влияние пространственного расположения гранул на формируемое в МГЧ ориентационное текстурирование и на его намагничивание в статическом магнитном поле \mathbf{H} . Результаты получены с помощью компьютерного моделирования методом Монте-Карло.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ проект № 75-02-2023-935 «Уральский математический центр».

Особенности 3D печати композитных материалов PVDF+CFO

Ершов П.А., Мурзин Д.В., Амиров А.А., Омелянчик А.С., Воронцов П.А., Сергеев Е.Д.,
Родионов В.В., Воронцов С.А., Сальников В.Д., Родионова В.В.

БФУ им. И. Канта

Электронная почта ответственного автора: fofan89@gmail.com

Поливинилиденфторид (ПВДФ) представляет собой полукристаллический полимер с хорошими пьезоэлектрическими свойствами[1]. Добавление функциональных наполнителей может еще больше улучшить его свойства и расширить возможности его применения. Одним из перспективных функциональных наполнителей являются частицы CoFe_2O_4 (CFO)[2], которые могут сделать из полимера материал с комбинацией электрических и магнитных свойств - мультиферроик, являющийся перспективным в биомедицинских приложениях, сенсорике, и направлении “мягкой робототехники”.

В этой работе исследуются эффекты связанные со структурной перестройкой ПВДФ при добавлении магнитных CFO частиц, изменяющиеся при этом кристаллические свойства полимера и как следствие - функциональные пьезоэлектрические и магнитоэлектрические свойства. Также одной из задач разработки композита, является его адаптация к 3D печати, для расширения возможности создания устройств и деталей на его основе.

- [1] Ueberschlag, P. (2001). PVDF piezoelectric polymer. *Sensor Review*, 21(2), 118–126. <https://doi.org/10.1108/02602280110388315>
- [2] Supriya, S., Kumar, L., & Kar, M. (2018). Optimization of dielectric properties of PVDF-CFO nanocomposites. *Polymer Composites*, 40(3), 1239–1250. <https://doi.org/10.1002/pc.24840>

Компьютерное моделирование времен релаксации взаимодействующих броуновских частиц в переменном магнитном поле

Зверев В.С.¹, Елфимова Е.А.¹, Иванов А.О.¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
Электронная почта ответственного автора: Vladimir.Zverev@urfu.ru

Определение динамической восприимчивости феррожидкости в переменных полях большой амплитуды, за пределами области линейного отклика, важно для многих приложений, включая магнитную гипертермию, неинвазивный метод томографической магнитной визуализации (Magnetic Particle Imaging), биосенсорику. Анализ характерных времен релаксации магнитных частиц, определяемых в том числе по динамической восприимчивости, также применяется для определения характеристик молекулярного связывания, вязкости, нагрева и локальной жесткости матрицы-среды [1].

Существует множество исследований, посвященных динамическому магнитному отклику феррожидкостей, помещенных в колеблющееся внешнее поле с произвольной амплитудой. Большинство теоретических исследований рассматривают феррожидкость как идеальный суперпарамагнитный “газ”, тогда как настоящая работа сосредоточена на эффектах межчастичных диполь-дипольных взаимодействий и сосредоточена на влиянии диполь-дипольного взаимодействия на динамическую восприимчивость.

В работе [2] был предложен метод компьютерного моделирования динамической восприимчивости феррожидкости с помощью молекулярной динамики в переменном магнитном поле произвольной амплитуды. Феррожидкость моделируется как монодисперсная система равномерно намагниченных сферических частиц, взвешенных в жидкости цилиндрического контейнера, заполняющей длинный цилиндр. Предполагается, что направление магнитного момента может изменяться из-за вращения наночастицы как твердого тела, то есть при учете только броуновского механизма изменения магнитного момента наночастицы. Доклад посвящен методам получения и описанию видов характерных времен, которые могут быть извлечены из спектра динамической восприимчивости, найденным с помощью алгоритма из [2], и их поведению с ростом амплитуды внешнего переменного поля. Результаты проведенного компьютерного моделирования хорошо согласуются с теоретическими моделями характерных времен релаксации при учете диполь-дипольного взаимодействия в рамках модели среднего поля [3].

Работа выполнена в рамках плана научных исследований Уральского математического центра УрФУ, Соглашение с Минобрнауки России № 075-02-2023-935.

[1] Weaver, J.B. and Kuehlert, E. *Med. Phys.*, 2012.

[2] Zverev, V., Dobroserdova, A., Kuznetsov, A., Ivanov, A., Elfimova, E., *Mathematics*, 2021.

[3] Ivanov, A.O., Zverev, V., and Kantorovich S. S., *Soft Matter*, 2016.

Магнитогранулометрический анализ феррожидкостей по частотным спектрам динамической начальной магнитной восприимчивости

Иванов А.О.¹, Зверев В.С.¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
Alexey.Ivanov@urfu.ru

Работа посвящена применению разработанного ранее [1] математического алгоритма численного решения обратной задачи магнитной гранулометрии для обработки экспериментальных данных [2] по частотным спектрам динамической начальной магнитной восприимчивости суспензий наночастиц феррита кобальта. Результаты обработки данных представлены на рисунках 1 – 4 для образцов с различной вязкостью, но близким распределением феррочастиц по размерам и временам релаксации.

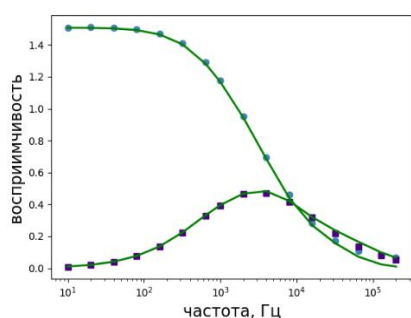


Рисунок 1 – Частотный спектр образца наносуспензии Fe-Co при вязкости 3.39 мПа с

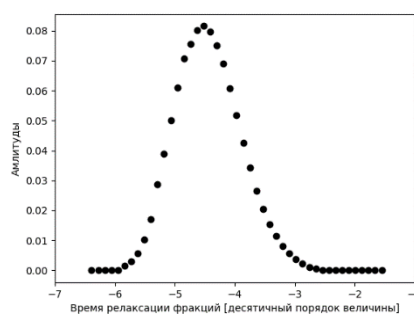


Рисунок 2 – Распределение по временам релаксации образца Рис. 1

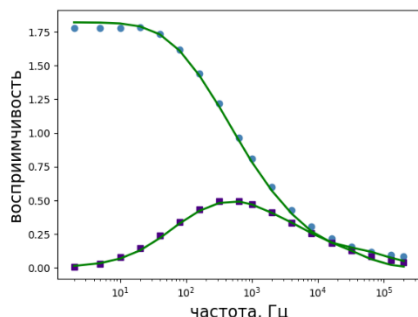


Рисунок 3 – Частотный спектр образца наносуспензии Fe-Co при вязкости 8.33 мПа с

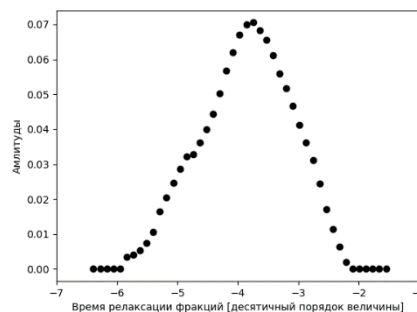


Рисунок 4 – Распределение по временам релаксации образца Рис. 3

Повышение вязкости несущей жидкости приводит к заметному сдвигу распределения феррочастиц по временам релаксации в область больших времен, что обусловлено преобладанием частиц с броуновским механизмом релаксации.

Работа выполнена в рамках плана научных исследований Уральского математического центра УрФУ, Соглашение с Минобрнауки России № 075-02-2023-935.

[1] А.О. Иванов, В.С. Зверев, Mathematics, 9 (2021) 2450;

[2] А.В. Лебедев, В сб. «XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред», ИМСС УрО РАН, Пермь, 2023.

Магнитные диски с распределенным диполем

Розенберг М., Канторович С.С.*

Венский университет, Вена, Австрия
sofia.kantorovich@univie.ac.at

В последние годы возрос интерес к магнитным наночастицам несферической формы. Во многом это связано с их особыми свойствами, которые оказываются особенно чувствительно к изменениям внутренней магнитной анизотропии материала и/или анизотропии формы наночастицы. Несмотря на то, что были проведены обширные исследования новых методов синтеза, глубокое понимание магнитных коллоидных суспензий существует преимущественно для случая сферических частиц.

В этом докладе мы исследуем микроструктуру и начальную магнитную восприимчивость систем анизотропических дипольных магнитных нанопластинок, чтобы понять применимость теорий и моделей на основе дипольных сфер для таких систем. Мы покажем, что микроструктура, характеризуемая распределением частиц и самосборкой пластинок, значительно отличается от структур, возникающих для сфер как количественно, так и качественно. Мы обнаружили более низкую начальную статическую магнитную восприимчивость в системах нанопластинок, чем в сопоставимых суспензиях дипольных сфер. При меньших значениях константы магнитной связи это можно учесть введением поправок на объемную долю. Однако для систем с более сильными магнитными взаимодействиями поведение оказывается другим.

Синтез и характеристика агрегатов магнетита и серебра как потенциального объекта для биологического применения

Козенкова Е.И.¹, Омелянчик А.С.¹, Родионова В.В.¹

¹НОМЦ им. Софьи Ковалевской БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия
Электронная почта ответственного автора: ekozenkova1@gmail.com

Магнитные наночастицы внесли значительный вклад в область наномедицины в качестве агентов для тераностики онкологических заболеваний. В нашей работе мы синтезировали агрегаты, состоящие из магнетита и серебра, как потенциальную систему для адресной доставки в различные органеллы клеток, включая митохондрии [1,2].

Магнитные наночастицы Ag/Fe₃O₄ были получены методом соосаждения. Сначала были получены коллоидные частицы серебра (из раствора серебра при растворении в 50 мл воды и добавлении раствора цитрата натрия). Далее магнетит получали соосаждением с использованием сульфатов железа 2⁺ и 3⁺ в соотношении 1:2 при нагревании до 80°C и добавлении гидроксида натрия. Затем растворы коллоидного серебра и магнетита смешали с водой и нагрели до испарения. Для создания стабильной суспензии агрегатов Ag/Fe₃O₄ использовали 2-метилбутанол-1.

Были проведены исследования магнитных свойств (рис. 1). При температуре 300 К образцы проявляют суперпарамагнитное поведение с намагниченностью насыщения ($M_S = 24$ эме/г) и практически нулевой остаточной намагниченностью. Пониженное значение намагниченности насыщения по сравнению с магнитными оксидами железа Fe₃O₄ и γ -Fe₂O₃ (80-92 эме/г) связано с наличием в образцах диамагнитного серебра.



Рисунок 1 – Зависимость намагниченности от внешнего магнитного поля, измеренная при 300 К и температурные зависимости намагниченности наночастиц Ag/Fe₃O₄.

Положение максимума кривой ZFC пропорционально температуре блокировки T_B , при которой происходит переход из заблокированного ферромагнитного состояния в суперпарамагнитное. Вероятно, вклад в анизотропию вносят поверхностные разорительные спины, граница раздела между магнетитом и серебром, а также межчастичное магнитодипольное взаимодействие.

Исследование проведено в рамках Соглашения от 16.02.2023 № 075-02-2023-934.

Авторы выражают благодарность профессору Института химии металлоорганических соединений Итальянского национального исследовательского совета Клаудио Сангрегорио.

- [1] S. D. Solomon, Journal of Chemical Education. Vol. 84 (2), 2007;
- [2] S. Raza, Biosynthesis of silver nanoparticles for the fabrication of non cytotoxic and antibacterial metallic polymer based nanocomposite system. Sci Rep 11, 2021.

Влияние магнитных взаимодействий на деформацию микрокапель дисперсной фазы эмульсий

Кононенко Д.В.¹, Закиян А.Р.¹

¹Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия

Электронная почта ответственного автора: daria.emerald8@gmail.com

Проблема деформации капель жидкости во внешних полях является традиционным направлением исследований в области гидродинамики многофазных сред. Значительное внимание уделялось, в частности, исследованию деформации капель магнитных жидкостей в стационарных и переменных магнитных полях. При этом в существующих исследованиях рассматриваются отдельные (уединенные) капли жидкости.

Влияние взаимодействий капель на их равновесную форму в стационарно внешнем поле ранее рассматривалось лишь теоретически [1, 2]. Экспериментальные работы в этом направлении отсутствуют. В данной работе исследуется деформация капель магнитной эмульсии, приготовленной на основе магнитной жидкости типа «магнетит в керосине» и масла АМГ-10 [3]. Указанная эмульсия имеет низкое межфазное натяжение, позволяющее наблюдать значительную деформацию капель ее дисперсной фазы при воздействии относительно слабых магнитных полей, в которых намагничивание магнитной жидкости можно считать происходящим по линейному закону. Исследовались эмульсии, представляющие собой дисперсию магнитных микрокапель в немагнитной среде и наоборот – эмульсии немагнитных микрокапель в магнитной среде. Изучался монослой эмульсий, подвергающийся действию внешнего стационарного магнитного поля создаваемого катушками Гельмгольца и направленного вдоль плоскости слоя. Наблюдения происходили с помощью оптического микроскопа.

Проводились исследования при различной концентрации капель дисперсной фазы. В результате проведенных исследований было показано, что величина деформации капель дисперсной фазы зависит от концентрации капель, их взаимодействие приводит к увеличению степени деформации по сравнению с уединенными каплями (рис. 1).

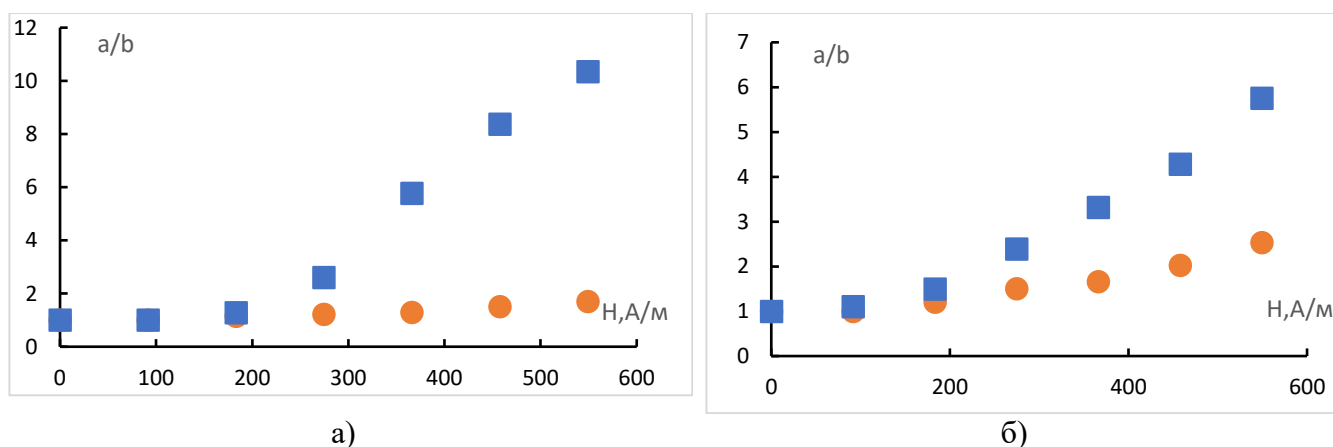


Рисунок 1 – Зависимость отношения полуосей а) магнитной микрокапли в немагнитной среде от величины магнитного поля и б) немагнитной микрокапли в магнитной среде от величины магнитного поля

- [1] O. Volchek, A.I. Gusarov, A.V. Dotsenko, V.A. Tsekhomsky, Phys. Rev. E 69 (2004) 011504.2. Takrir-i Sükun Kanunu. 4 Mart 1341 Tarih ve 578 Numaralı. // TBMM Zabıt Ceridesi, Cilt: 30, s. 19.
[2] A. O. Ivanov, O. B. Kuznetsova, Phys. Rev. E 85 (2012) 041405.
[3] A. Zakinyan, Y. Dikansky, Colloids Surf. A 380 (2011) 314-318.

Влияние структурирования магнитных частиц на магнитореологический эффект в магнитоактивных эластомерах

Костров С.А.¹, Крамаренко Е.Ю.¹

¹*Московский государственный университет, физический факультет, Москва, Россия.*

sergeykostrov1996@gmail.com

Композитные материалы, состоящие из магнитных частиц, помещенных в полимерную матрицу, называются магнитоактивными эластомерами (МАЭ). Данные материалы объединяют в себе упругие и магнитные свойства и способны демонстрировать отклик на магнитное поле. При приложении внешнего магнитного поля магнитные частицы внутри материала начинают взаимодействовать друг с другом, за счет чего меняются многие физические свойства материала. В данной работе основное внимание будет уделено магнитореологическому эффекту: то есть изменению вязкоупругих свойств МАЭ в магнитном поле.

Одним из направлений исследований в области МАЭ являются материалы с неоднородным профилем распределения магнитных частиц внутри композита. Свойства таких МАЭ будут зависеть от направления и отличаться от изотропных аналогов. Большинство данных в литературе по этой теме посвящено изучению образцов с модулями упругости $G > 100$ кПа.

В данной работе были синтезированы изотропные и анизотропные МАЭ на основе матриц полидиметилсилоксана и магнитных частиц сферического и пластинчатого карбонильного железа с начальными модулями упругости $G \sim 10-100$ кПа и концентрациями магнитного наполнителя 50-83 мас.%. Образование ориентированных структур магнитного наполнителя было показано с помощью сканирующего электронного микроскопа. Показано, что начальный модуль упругости анизотропных образцов в 2-3 раза превосходит модуль изотропных аналогов, а относительный рост упругого модуля в магнитном поле является сопоставимым. Падение модуля упругости при увеличении деформации является более выраженным для анизотропных образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 19-13-00340-П).

О влиянии магнитной анизотропии на динамические свойства однодоменных наночастиц и суперпарамагнитных нанокластеров

Кузнецов А.А.¹, Канторович С.С.¹

¹*Венский университет, Вена, Австрия*

Электронная почта ответственного автора: andrey.kuznetsov@univie.ac.at

Доклад посвящен проблеме математического моделирования стохастической динамики магнитных наночастиц, взвешенных в вязкой немагнитной матрице и обладающих конечной энергией магнитной анизотропии. Приводится краткий обзор существующих в литературе подходов и анализируются концептуальные различия между ними. Делается вывод, что наиболее полной и последовательной моделью для описания магнитодинамики суперпарамагнитных коллоидов на сегодняшний день является модель Усаделя [1]. В докладе мы продемонстрируем, что на частотах внешних полей, значимых для многих биомедицинских приложений, эта модель может быть сведена к «модели яйца» Степанова-Шлиомиса [2].

Программная реализация модели яйца была выполнена нами на базе открытого пакета молекулярно-динамического моделирования ESPResSo [3]. Во второй части доклада мы продемонстрируем на нескольких примерах как этот инструмент может быть успешно использован в современных задачах физики наномагнетизма.

В первую очередь будет рассмотрена задача о спектре динамической восприимчивости уединенного суперпарамагнитного нанокластера. Кластер моделируется как жёсткое сферическое тело, заполненное заданным числом сферических магнитных гранул. Каждая гранула обладает постоянным по величине магнитным моментом и одноосной магнитной анизотропией. Ориентационное и пространственное распределение гранул в кластере случайно. В широком диапазоне частот внешнего поля анализируется, как изменения в энергии анизотропии гранул и силе диполь-дипольного взаимодействия между ними влияют на поведение мнимой и действительной компоненты восприимчивости.

Также будет приведено численное решение задачи о поступательной динамике активного магнитного «нанопловца» в однородном поле. Наша модель пловца во многом аналогична модели, рассмотренной ранее в работе [4]. Основным отличием будет отказ от приближения жёсткого диполя и прямой учёт неелевской релаксации магнитного момента.

[1] K. D. Usadel, Phys. Rev. B, 95 (2017) 104430;

[2] V.I. Stepanov, M.I. Shliomis, Bull. Acad. Sci. USSR, Ser. Phys., 55 (1991), 1;

[3] <https://espressomd.org/>

[4] M. Kaiser, Y. Martinez, A.M. Schmidt, P.A. Sánchez, S.S. Kantorovich, JML, 304 (2020) 112688.

Движение анизотропных намагничивающихся тел в неоднородном магнитном поле

Меркулов Д.И.¹, Пелевина Д.А.^{1,2}, Турков В.А.¹, Налетова В.А.¹

¹НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

merkulovdima@mail.ru

Рассматривается движение сферического тела из анизотропного намагничивающегося эластомера (АНЭ) под действием неоднородного магнитного поля. В начальный момент времени тело располагалось на оси электромагнитной катушки (см. Рис. 1) и при включении тока двигалось вбок по наклонной плоскости (см. Рис. 2) с возможным последующим отрывом от нее (либо остановкой на плоскости в положении равновесия) под действием горизонтальной составляющей магнитной силы и момента магнитных сил.

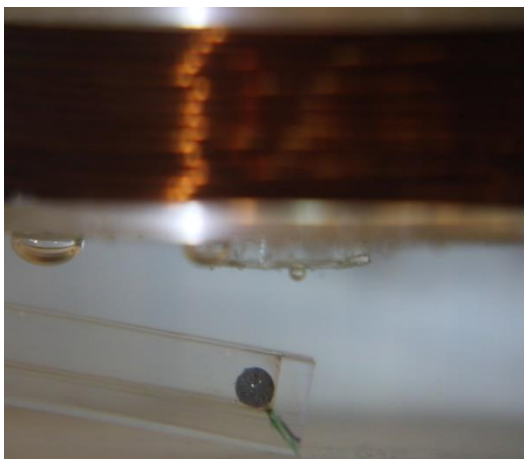


Рисунок 1 – Тело из АНЭ в начальный момент времени

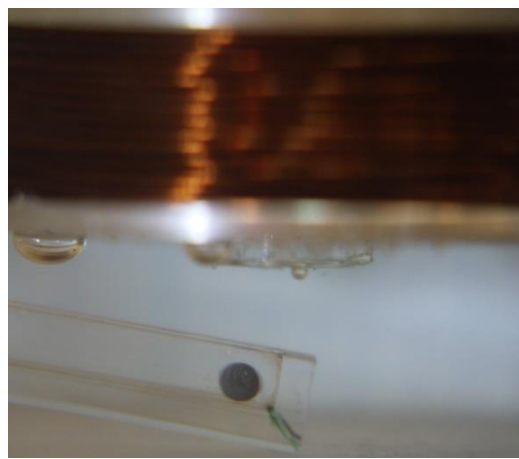


Рисунок 2 – Движение тела из АНЭ при включении тока

Кроме того, в данной работе исследовано движение маятника с закрепленным на его конце сферическим телом из АНЭ в неоднородном магнитном поле. Жесткая фиксация тела на стержне маятника позволяет исключить из рассмотрения момент магнитных сил и зарегистрировать боковое отклонение тела только под действием горизонтальной составляющей магнитной силы.

Построены траектории тел при различных токах в электромагнитной катушке. Показано, что в зависимости от величины тока свободное тело из АНЭ может занять положение равновесия на наклонной плоскости либо оторваться от нее, а маятник отклоняется от начального положения равновесия под действием горизонтальной составляющей магнитной силы (существование которой было ранее предсказано теоретически). Построены математические модели движения тел и проведены численные расчеты на основе параметров эксперимента. Получено качественное соответствие теоретических результатов и экспериментальных данных.

Повышение чувствительности спектроскопии ЯМР в мягких магнитных материалах

Мершиев И.Г.¹, Куприянова Г.С.¹, Вурмель С.²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

²Лейбницевский институт физики твёрдого тела и материаловедения, Дрезден, Германия

IMershiev@kantiana.ru

Одним из применений спектроскопии ядерного магнитного резонанса является исследование структуры магнитоупорядоченных веществ в отсутствии внешнего магнитного поля [1]. Методом ЯМР можно наблюдать сигналы от ядер, находящихся в границах магнитных доменов и внутри них, причём из-за взаимодействия электронных и ядерных магнитных моментов в магнитных образцах сигнал ЯМР многократно усиливается. В доменных границах фактор усиления может составлять от 1000 до 10000, внутри доменов – от 100 до 500 [2]. Таким образом, чувствительность метода ЯМР в ферромагнетиках косвенно зависит от ширины доменных стенок и связанной с ней магнитной анизотропией образца.

Как показывает описание спиновой динамики в границах магнитных доменов [3], при использовании возбуждающей последовательности спинового эха удаётся полностью возбудить лишь малую часть ядер в доменной границе. В данной работе предложено использование адиабатических возбуждающих импульсов с амплитудной и фазовой модуляцией, которые позволяют компенсировать неоднородность эффективного поля возбуждения, воздействующего на доменную границу, и в несколько раз повысить интенсивность сигнала спинового эха в образцах с малой магнитной анизотропией.

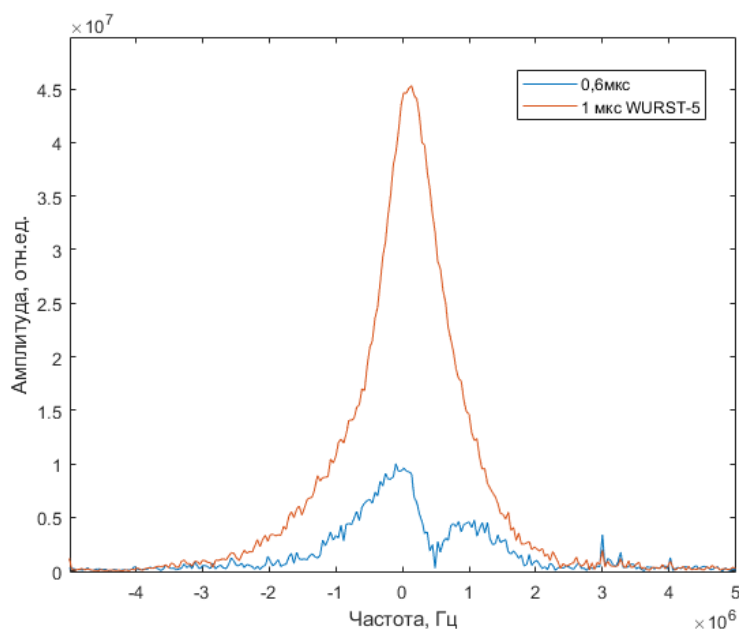


Рисунок 4 – Сравнение интенсивности спектра сигнала спинового эха в образце Co_2FeGa при возбуждении прямоугольными импульсами и адиабатическими импульсами семейства WURST.

[1] S. Wurmehl and J. T. Kohlhepp, J. Phys. D. Appl. Phys. 41, 173002 (2008).

[2] I. S. Oliveira and A. P. Guimarães, J. Magn. Magn. Mater. 170, 277 (1997).

[3] M. B. Stearns, Phys. Rev. 162, 496 (1967).

Магнитный гистерезис в тонких пленках пермаллоя на основе магнитоплазмонного кристалла

Митрофанов Т.А.¹, Колесникова В.Г.¹, Гриценко К.А.¹

¹ *Балтийский Федеральный Университет, г. Калининград, Россия*

Fearmen7@gmail.com

На сегодняшний день одной из актуальных исследовательских задач является создание цифрового двойника магнитоплазмонного кристалла на основе тонких пленок пермаллоя. Такие системы нашли широкое применение в производстве датчиков магнитного поля, использующихся в таких сферах, как медицина (магнитные кардиографы, магнитные энцефалографы, испытания различных протезов и имплантов [1]), космические исследования (производство спутников [2]), а также в области обеспечения безопасности (энтроскопы и металлоискатели [3]).

Внедрение цифровых двойников позволит прогнозировать такие магнитные характеристики и свойства, как коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, механизмы перемагничивания в зависимости от толщины рассматриваемой тонкой пленки и геометрических параметров кристалла. Это даст возможность выбирать оптимальные параметры для его использования в конкретных приложениях, минуя проведение дорогостоящих и трудозатратных лабораторных экспериментов [4].

В данной работе с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics была построена трехмерная модель тонких плёнок пермаллоя на основе дифракционной решетки с периодом 740 нм и высотой 20 нм. Используя модель Джилса-Атертона, был смоделирован магнитный гистерезис. Результаты работы будут использованы для дальнейшего определения оптимальных параметров работы датчика магнитного поля на основе магнитоплазмонного кристалла.

Список литературы:

- [1] Murzin D. et al. Ultrasensitive magnetic field sensors for biomedical applications //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 6. – С. 1569;
- [2] Wei S. et al. Recent progress of fluxgate magnetic sensors: basic research and application //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 4. – С. 1500;
- [3] Eleftherakis D., Vicen-Bueno R. Sensors to increase the security of underwater communication cables: A review of underwater monitoring sensors //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 3. – С. 737;
- [4] Kalidindi S. R. et al. digital twins for Materials //Frontiers in Materials. – 2022. – Т. 9. – С. 48.

Одноосные напряжения в магнитных эластомерах

Мусихин А.Ю.¹, Зубарев А.Ю.¹, Степанов Г.В.²

¹Уральский Федеральный университет, Екатеринбург, Россия.

²Государственный научный центр Российской Федерации, Институт химии и технологии элементоорганических соединений, Москва, Россия.

Электронная почта ответственного автора: Antoniusmagna@yandex.ru

Предложена модель, описывающая экспериментально наблюдаемые нелинейные зависимости одноосных напряжений в упругом магнитном полимере, заполненном намагничивающимися частицами, объединенными в линейные цепочки, от деформации в присутствии внешнего магнитного поля.

Обычно эти цепочки появляются на стадии полимеризации композита, если она происходит под действием внешнего магнитного поля. Эксперименты показывают, что реологические свойства магнитных полимеров с внутренней анизотропной структурой сильно отличаются от свойств внутренне изотропных композитов. Макроскопические магнитомеханические эффекты в этих материалах определяются морфологией внутреннего пространственного расположения частиц в полимере. Цепочечная морфология представлена на Рис.1

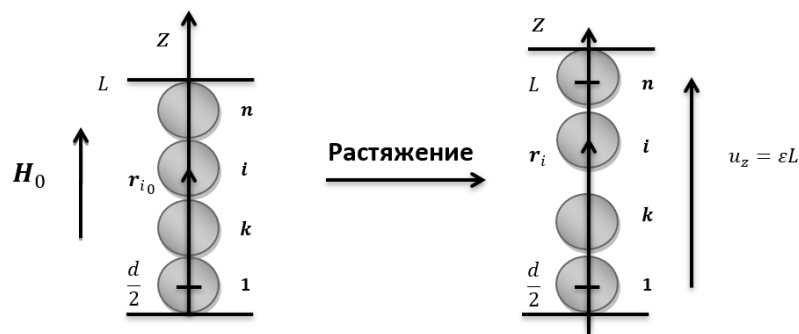


Рисунок 5 – Иллюстрация моделируемой системы.

Модель основывается на статическом равновесии между упругими силами матрицы полимера и магнитными силами диполь-дипольного взаимодействия между частицами в цепочке [1]:

$$\beta(\mathbf{u} - \mathbf{u}_i) + \mathbf{F}_i = 0, \quad i = 2, \dots, n - 1. \quad (1)$$

Эта модель позволит вычислить положения каждой частицы в отдельно взятой цепочке после деформации образца, в результате чего планируется рассчитать напряжение растяжения в композите.

Работа выполнена при поддержке Министерства Науки и Образования РФ, проект FEUZ-2023-0020.

[1] Zubarev A. Y., Iskakova L. Y. and Lopez-Lopez M. T. Towards a theory of mechanical properties of ferrogels. Effect of chain-like aggregates. // Physica A. —2016. — V. 455. — P. 98 — 103.

Теоретическое моделирование отклика магнитоактивного эластомера на внешнее магнитное поле в одночастичном приближении

Наджарьян Т.А.^{1,2}, Крамаренко Е.Ю.^{1,2}

¹*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

²*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва, Россия*

Электронная почта ответственного автора: nadz@polly.phys.msu.ru

Магнитоактивные эластомеры – это полимерные композитные материалы, содержащие ферромагнетик в качестве наполнителя. Частицы ферромагнетика, диспергированные в полимерной матрице, намагничиваются, взаимодействуют и смещаются в результате действия внешнего магнитного поля, изменяя внутреннюю структуру и свойства материала.

В данной работе вызываемые магнитным полем структурные изменения материала, а также изменения его механических свойств предлагается рассматривать в рамках упрощённой одночастичной модели. Эта модель предполагает изучение отдельных ячеек объёма материала, содержащих единственное ферромагнитное включение, природа которого может в значительной степени различаться. В данной модели предполагается, что включение может представлять собой крупную частицу ферромагнетика или достаточно плотный кластер небольших частиц.

Рассматривается формирование кластеров ферромагнитных частиц в композите в присутствии однородного внешнего магнитного поля. Движение частиц в ячейке с заданной объёмной концентрацией наполнителя моделируется при помощи метода конечных элементов в приближении магнитостатики и гиперупругости. Для различных магнитных полей и характеристик материала вычисляется количество частиц в кластере, а также параметры формы кластера как параметры соответствующего эллипсоида инерции.

В рамках одночастичного приближения рассматриваются ячейки материала с уединённым анизотричным включением. Для описания состояния ячейки используется модель Стонера-Вольфарта, дополненная механической энергией, запасаемой в ячейке в результате движения включения. Рассматривается влияние начального положения включения, его анизотричности и концентрации наполнителя на эффективный модуль упругости материала при вращательном и трансляционном движении включения, а также при деформации ячейки. Также рассматривается зависимость параметров движения включения от внешнего магнитного поля.

В результате получены и описаны зависимости характеристик кластеров ферромагнитных частиц, образующихся в магнитоактивных эластомерах в присутствии однородного внешнего магнитного поля, а также зависимости характеристик магнитореологического эффекта от концентрации наполнителя и геометрических параметров ферромагнитных включений.

Авторы выражают благодарность РФФИ за финансовую поддержку (грант 19-13-00340-П).

Моделирование и экспериментальное исследование тепловых процессов в магнитожидкостном герметизаторе

Нестеров С.А.¹, Бакланов В.Д.^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
г. Иваново, Российская Федерация

Электронная почта ответственного автора: elmash@em.ispu.ru

Основным фактором, сдерживающим применение магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) на мощных машинах с вращающимися валами большого диаметра является рост линейной скорости на поверхности вала и связанные с этим центробежные усилия и деструктивные эффекты, происходящие в слое магнитной жидкости (МЖ) под действием вязкостного разогрева [1].

С развитием систем численного расчёта физических полей интерес исследователей, изучающих теоретические и практические аспекты феррогидродинамики, смещается в сторону создания моделей для комплексной оценки совокупности взаимодействующих физических процессов.

Разработанная численная математическая модель для связанного расчёта магнитных, гидродинамических и тепловых процессов, позволяет оценить величину и скорость вязкостного разогрева МЖ от вращающегося вала в высокоскоростных МЖГ.

Сравнение результатов численного расчёта с данными физического эксперимента показывают, что использование для определения теплопроводности МЖ уравнения (1) [20], а для определения теплоёмкости МЖ выражения (2) [21] позволяет с достаточной для инженерных расчётов точностью описать теплофизические свойства концентрированных МЖ.

$$C_{\text{МЖ}} = c_m^O \cdot C_p^O + c_m^C \cdot C_p^C + c_m^M \cdot C_p^M \quad (2)$$

$$\lg(\lambda) = (1 - c_V) \cdot \lg(\lambda_O) + c_V \cdot \lg(\lambda_M) \quad (2)$$

Экспериментальным путём показано, что на величину вязкостного разогрева магнитожидкостной пробки при продолжительном режиме работы МЖГ определяющее влияние оказывает степень падения вязкости МЖ с ростом температуры. Правильный подбор МЖ может значительно снизить перегрев и увеличить ресурс МЖГ.

Выбор необходимого объёма МЖ для заправки МЖГ может оказать существенное влияние на работоспособность высокоскоростных уплотнений. Температура, при увеличении объёма МЖ, растёт практически линейно, а удерживаемый МЖГ перепад давления значительно возрастает при увеличении площади поперечного сечения МЖ пробки от 2 до 4 мм, однако в дальнейшем при добавлении МЖ растёт уже не так значительно. Разработка методики расчёта оптимального объёма МЖ является актуальной научной задачей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00156, <https://rscf.ru/project/22-79-00156/>.

[1] W. Horak, M. Szczęch, Magnetohydrodynamics, vol. 252 (2002) pp.321-323;

[2] Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков. Магнитные жидкости, Москва, 1989;

[3] В. Е. Фертман Магнитные жидкости: Справочное пособие, Высшая школа, 1988.

Корреляция толщины оболочки и термомагнитных эффектов в наночастицах типа ядро/оболочка

Домингос К.¹, Акино Р.^{1,2}, Омельянчик А.С.³, Пшеничников С.Е.³, Левада Е.В.³, Родионова В.В.³, Кабрейра Гомес Р.⁴, Гомиде Г.⁵, Луис Ф.⁵, Деспейрот Ж.⁵, Гомес да Силва Ф.⁵

¹Институт химии, Университет Бразилии, Бразилиа, Бразилия

²Лаборатория экологических и прикладных нанонаук - LNAА, факультет UnV Planaltina, Университет Бразилиа, Бразилиа, Бразилия

³Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

⁴Физический факультет, Федеральный университет Санта-Катарины, Флорианополис, Бразилия

⁵Группа сложных жидкостей, Институт физики, Университет Бразилии, Бразилиа, Бразилия.

Электронная почта ответственного автора: asomelyanchik@kantiana.ru

Магнитные наночастицы (МНЧ) со структурой ядро/оболочка могут быть использованы в качестве агентов нагрева в магнитной гипертермии для лечения рака [1]. Магнитная гипертермия предполагает введение МНЧ в организм, а затем воздействие на них высокочастотным магнитным полем для нагрева близлежащих клеток. Для этой цели наиболее важно точно настроить магнитные свойства МНЧ, чтобы увеличить параметр SAR (Specific Absorption Rate) и тем самым уменьшить дозу вводимого препарата. Этого можно достичь путем создания МНЧ со структурой ядро/оболочка, состоящих из магнитотвердых и мягких материалов. В данной работе мы исследовали МНЧ, состоящие из ядра маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с толстой и тонкой толщиной оболочки из феррита кобальта CoFe_2O_4 . Для синтеза этих наночастиц использовалась модифицированная реакция соосаждения с последующей гидротермальной обработкой поверхности. Наши результаты показали, что толщина оболочки феррита кобальта играет решающую роль в повышении параметра SAR в магнитной гипертермии. В частности, мы обнаружили, что тонкая оболочка из феррита кобальта была более эффективной, чем толстая, что подчеркивает важность тонкой настройки структуры МНЧ на этапе синтеза для их последующего применения.

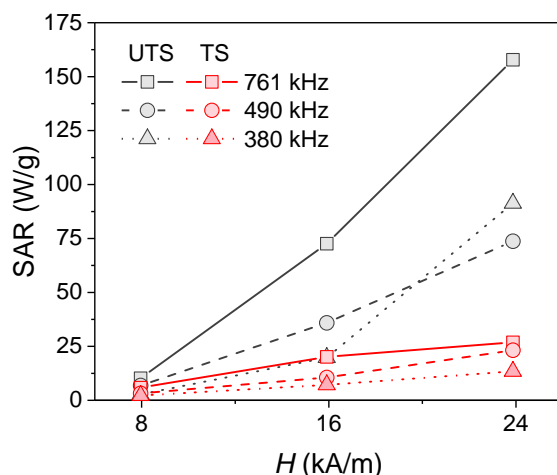


Рисунок 6 – Значения SAR, измеренные для МНЧ, состоящих из маггемита с тонкой (TS) и ультратонкой (UTS) оболочкой из феррита кобальта, при различной величине и частоте поля.

Газодинамические аспекты проектирования лабораторной установки для получения микропорошков методом газового распыления в горизонтальном реакторе.

Погосян Э.К.^{1,2}, Стасюк И.О.^{1,3}, Савин В.В.^{1,4},

¹ - образовательно-научный кластер «Институт высоких технологий» ФГОУВО «БФУ им. И. Канта»
(Калининград, Россия)

edmondpoghosyan@yandex.ru;

Одним из самых распространённых методов производства порошков для аддитивного производства является метод газового распыления, который в достаточной мере может обеспечить высокие объёмы производства и технологические параметры, предъявляемые к порошку [1]. Однако, чем шире применение аддитивных технологий становится, тем больше требуется производство порошков из различных металлов и сплавов. Тогда возникает необходимость в исследованиях и адаптации методики производства порошков под конкретный металл или сплав в зависимости от его особенностей.

Современное промышленное оборудование как правило имеет большие габариты и работает при высоких давлениях газа распылителя [2]. Оно рассчитано под значительные объёмы сырья и мало ориентировано под получение материала для лабораторных исследований и малое производство дорогостоящих материалов (драгоценные и редкоземельные металлы и их сплавы). Данная статья посвящена исследованию возможности создания малогабаритной экспериментальной установки, обеспечивающей широкий спектр изменения параметров распыления при давлениях близких к атмосферному.

По итогам работ представлена новая схема получения металлических порошков путем газового распыления в горизонтальном реакторе при перпендикулярных направлениях потоков расплава и распыляющего газа. С использованием программного пакета ANSYS рассчитана газодинамическая картина процессов в предложенной конструкции. Жидкий металл рассматривается как совокупность сферичных дисперсных частиц за упрощением и ускорением расчетов моделирования. Подготовлена почва для оптимизации конструкции лабораторной установки для будущих исследований и получения экспериментального подтверждения о жизнеспособности предложенного метода получения микропорошков для аддитивных технологий.

[1] Осокин Е. Н. Процессы порошковой металлургии. Сибирский федеральный университет, 2008.

[2] В.М. Довбыш, Аддитивные технологии и изделия из металла, Центра Технологий ФГУП «НАМИ»

[3] О.С. Нечипоренко Распыленные металлические порошки. – Наук. Думка, 1980.

[4] ANSYS CFX-Solver Theory Guide: Release 13.0 // ANSYS, Inc – 2010. – 390 p.

[5] П.А. Лыков, Моделирование процесса распыления расплава в газовой струе. - Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2013.

Влияние полидисперсности на магнитные и структурные свойства феррокомпозита

Радушнов Д.И.¹, Соловьева А.Ю.¹, Елфимова Е.А.¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Электронная почта ответственного автора: Dmitry.Radushnov@urfu.ru

Работа посвящена теоретическому исследованию влияния полидисперсности на магнитные и структурные свойства ансамбля обездвиженных феррочастиц с учетом межчастичных дипольных взаимодействий и ориентационной анизотропии. Модель основана на следующих предположениях. Полидисперсность представляет собой набор из двух фракций частиц: крупные и мелкие. До полимеризации жидкой среды магнитные наночастицы свободно перемещались за счет броуновского движения, рисунок 1 (1 этап), поэтому магнитные моменты и оси легкого намагничивания могли менять свою ориентацию вместе с вращением тела частицы. Под воздействием внешнего магнитного поля и межчастичных взаимодействий феррочастицы упорядочиваются в ориентационную структуру, после чего система полимеризуется. Дальнейшая реакция полимеризованного композита с обездвиженными магнитными наночастицами на магнитное поле носит суперпарамагнитный характер, изменение ориентации магнитного момента происходит внутри тела наночастицы по неелевскому механизму за счет отклонения магнитных моментов от оси легкого намагничивания частиц, рисунок 1 (2 этап).

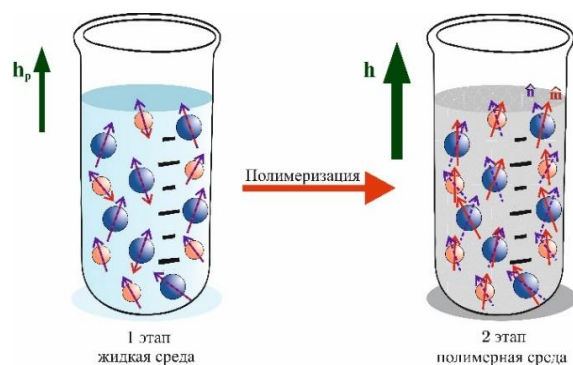


Рисунок 7 – Схематическая иллюстрация рассмотренного процесса. Красные стрелки – оси легкого намагничивания, синие стрелки - магнитные моменты, h_p, h – внешнее магнитное поле.

Было получено аналитическое выражение для намагниченности полимеризованного феррокомпозита с помощью вириального разложения до первого порядка по концентрации фракций дипольных частиц и интенсивности диполь-дипольных взаимодействий. Проанализировано влияние фракций крупных и мелких частиц на структурные и магнитные свойства системы. Проведено независимое компьютерное моделирование методом Монте-Карло (МК) для разных параметров системы. Данные, полученные методом МК, хорошо согласуются с теоретическими результатами.

Теоретическая часть работ выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «Базис» грант № 22-1-2-37-1; компьютерное моделирование проведено при поддержке «Уральского математического центра УрФУ» соглашение № 75-02-2023-935.

Моделирование динамического магнитного отклика ансамбля подвижных взаимодействующих феррочастиц в параллельно направленных ac и dc магнитных полях

Русанов М.С., Елфимова Е.А., Зверев В.С.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
Электронная почта ответственного автора: rusanoff.mixail@yandex.ru

В работе исследуется влияние подмагничивающего dc поля на динамический отклик ансамбля взаимодействующих подвижных магнитных частиц, находящихся в ac магнитном поле произвольной амплитуды. Предполагается, что реакция магнитных моментов на магнитные поля происходит по броуновскому механизму; ac и dc магнитные поля направлены параллельно. Основываясь на численном решении уравнения Фоккера-Планка для плотности вероятности ориентации магнитного момента случайно выбранной магнитной частицы, определены и проанализированы динамические намагниченность и восприимчивость для различных значений амплитуд ac поля, напряженности dc поля и интенсивности диполь-дипольных взаимодействий. Показано, что магнитный отклик системы формируется под влиянием конкурирующих взаимодействий, таких как диполь-дипольное взаимодействие, взаимодействия диполя с ac и dc полями. В области, когда энергии этих взаимодействий сравнимы наблюдаются неожиданные эффекты, когда восприимчивость системы может как увеличиваться, так и уменьшаться с ростом амплитуды ac поля (Рис. 1 (а)). Необычное поведение демонстрирует и положение максимума мнимой части восприимчивости при изменении амплитуды ac поля (Рис. 1 (б)): при увеличении напряженности dc поля частота максимума мнимой части меняет свое поведение с монотонного возрастания на более сложное.

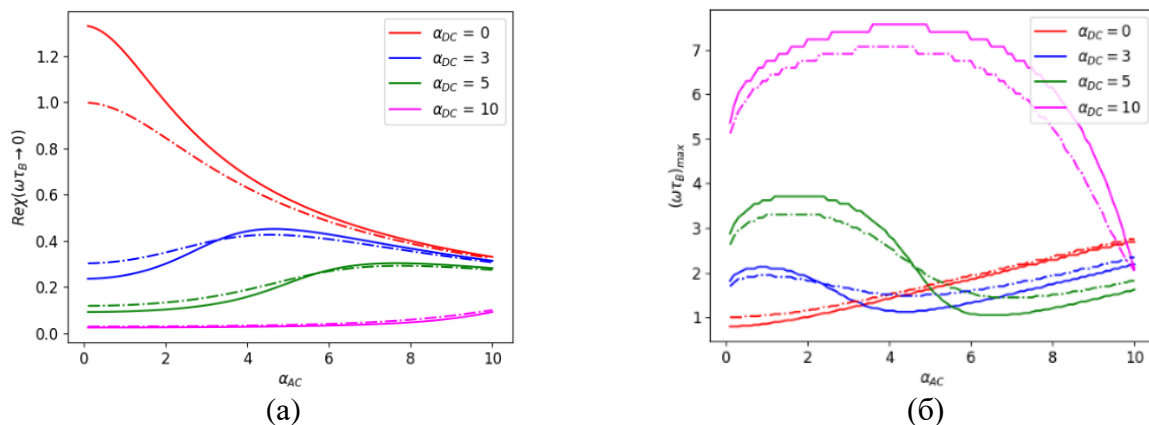


Рисунок 1 – Влияние амплитуды переменного поля α_{AC} на статическую восприимчивость (а) и безразмерную частоту максимума мнимой части (б) для восприимчивости Ланжевена $\chi_L = 1$. Сплошные линии – система взаимодействующих частиц, штрих пунктир – ансамбль невзаимодействующих частиц. Напряженность постоянного поля: $\alpha_{DC} = 0$ (красный), $\alpha_{DC} = 3$ (синий), $\alpha_{DC} = 5$ (зеленый), $\alpha_{DC} = 10$ (пурпурный).

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ проект № 75-02-2023-935 «Уральский математический центр».

Синтез и магнитные свойства наночастиц марганец-замещенных кобальтовых ферритов

Сальников В.Д.^{1,2}, Омелянчик А.С.¹, Родионова В.В.¹

¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

Электронная почта ответственного автора: russiatvotzach@gmail.com

Наноразмерные шпинельные ферриты являются перспективными материалами из-за особых физических свойств и областей, где они могут применяться (хранение информации, магнитной гипертермия, доставка лекарств, другие биомедицинские приложения) [1-3].

Благодаря разнообразным физико-химическим свойствам [4], существует возможность контролировать намагниченность и коэрцитивную силу магнитных наночастиц (МНЧ). Ферриты обладают структурой шпинели [5], в которой магнитные моменты катионов металлов упорядочены антиферромагнитно в двух подрешетках за счет суперобменных взаимодействий. Результирующая намагниченность является суперпозицией магнитных моментов двух подрешеток. Также важным аспектом изучения подобных материалов являются размерные эффекты, которые, в частности, проявляются в изменении магнитных свойств, которые могут быть вызваны отличием кристаллической структуры наноразмерного материала от объемных аналогов. Поскольку распределение катионов по подрешеткам шпинели в МНЧ зависит от их размеров и метода получения, то и магнитные свойства будут зависеть от этих параметров.

В данной работе были исследованы зависимости магнитных свойств МНЧ $Mn_xCo_{(1-x)}Fe_2O_4$ (где $x = 0.15, 0.25, 0.35, 0.45$), синтезированных методом золь-гель самосгорания с последующим отжигом. Методом вибрационной магнитометрии было показано, что максимальное значение намагниченности насыщения (M_s) ~ 70 эме/г обнаружено в образце с содержанием марганца $x = 0.35$. Отжиг при температуре $500^\circ C$ приводит к увеличению коэрцитивной силы, что вероятно связано с изменением в уровне инверсии шпинели и увеличении размера частиц, а отжиг при температуре $600^\circ C$ и выше вызывает образование гематита, что сопровождается уменьшением M_s .

Представленная работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-72-30032). Мы также благодарим Центр развития одаренных детей (г. Калининград) за предоставленную возможность проведения РСА измерений.

Список литературы:

- [1] Peddis D. et al. Magnetic interactions: A tool to modify the magnetic properties of materials based on nanoparticles // *Frontiers of Nanoscience*. 2014. Vol. 6. 129–188 p.
- [2] Optimizing Cobalt Ferrite Nanocrystal Synthesis Using a Magneto-optical Probe Einat Tirosh, Gabriel Shemer, and Gil Markovich *Chemistry of Materials* 2006 18 (2), 465-470
- [3] Li Z., Zhang Y., Feng N. Mesoporous silica nanoparticles: synthesis, classification, drug loading, pharmacokinetics, biocompatibility, and application in drug delivery // *Expert Opin. Drug Deliv.* Taylor & Francis, 2019. Vol. 16, № 3. P. 219–237.
- [4] Andersen H.L. et al. Crystalline and magnetic structure–property relationship in spinel ferrite nanoparticles // *Nanoscale*. 2018. Vol. 10, № 31. P. 14902–14914.
- [5] Silva F.G. da et al. Structural and Magnetic Properties of Spinel Ferrite Nanoparticles // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2019. Vol. 19, № 8. P. 4888–4902.

Влияние структурообразования в магнитных эмульсиях на спектр поглощения в сантиметровом диапазоне

Семенова С.А.¹, Туркин С.Д.^{1,2}, Закинян А.Р.^{1,3}

¹Северо-Кавказский Федеральный университет, физико – технический факультет, Ставрополь, Россия.

s.semyonovaa@yandex.ru

В данной работе проведены исследования поглощения электромагнитного излучения (1 МГц – 10 ГГц) композитом с высоко развитой морфологией – магнитная эмульсия. Отличительной особенностью данного материала от ранее синтезированных [1] является наличие высоких магнитных и диэлектрических свойств дисперсной среды – магнитная жидкость на основе воды. Дисперсной средой является масло VM-3. Эмульсия стабилизирована ПАВ.

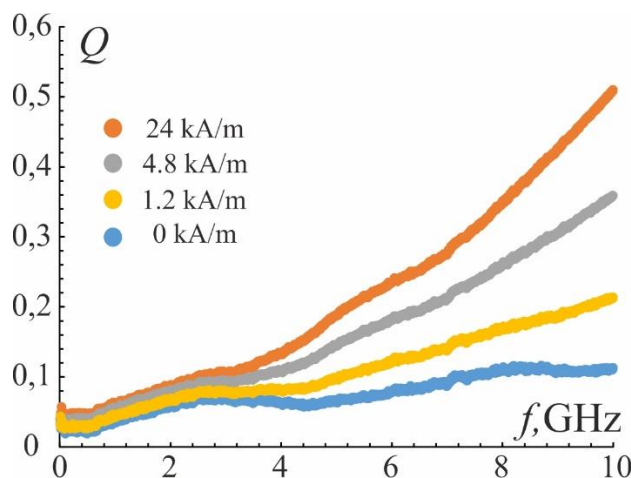


Рисунок 8 – График экспериментальных зависимостей коэффициента поглощения от частоты при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля.

На рисунке 1 представлен график зависимостей коэффициента поглощения от частоты электромагнитного излучения при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля. Объемная концентрация магнитных проводящих капель 10%. Как видно из рисунка, образование структур в образце при воздействии поля значительно увеличивает коэффициент поглощения, причем характер поведения такого влияния является нелинейным в зависимости от поля. Отсутствие интерференционной картины свидетельствует о том, что малое наличие проводящих капель магнитной жидкости увеличивает эффективную диэлектрическую проницаемость образца без значительных изменений в коэффициенте отражения. Таким образом, магнитная эмульсия может выступать в качестве материала с управляемыми поглощающими свойствами в области СВЧ.

[1] Zakinyan, Y. Dikansky, & M. Bedzhanyan, Electrical Properties of Chain Microstructure Magnetic Emulsions in Magnetic Field Magnetohydrodynamics, 35(1) (2013) 111-119.

Обобщенные волны-убийцы уравнения Гинзбурга-Ландау и нелинейное уравнение Клейна-Гордона

Трунин А.С.¹

¹ *Балтийский Федеральный Университет им. Иммануила Канта, г. Калининград, Россия*

Электронная почта ответственного автора: deletednyas@live.ru

Мы развиваем метод построения точных решений уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта (УЛЛГ) для ферромагнитных нанопроводов. Метод основан на установленной связи между УЛЛГ и нелинейным уравнением Шредингера (НУШ) и применяется для построения суперпозиции волн-убийц. Решения этого типа, известны как Р-бризеры и были получены Дубардом и Матвеевым, но их техника в значительной степени полагалась на использование решений еще одного нелинейного уравнения, уравнения Кадомцева-Петвиашвили I (КП-I). Мы показали, что на самом деле не нужно использовать КП-I, но вместо этого можно достичь тех же результатов работая только с решениями НУШ и применяя бинарное преобразование Дарбу. В частности, наш подход позволяет построить все Р-бризеры Дубара-Матвеева. Кроме того, новый метод может привести к некоторым совершенно новым, ранее неизвестным решениям. Одно конкретное решение, которое мы построили, описывает две «позиционные» волны, сталкивающиеся друг с другом и в процессе образуя новую, короткоживущую волну-убийцу. Мы назвали это необычное решение (в котором после удара двух солитонов рождается волна-убийца) «импактон».

В заключении мы выводим обобщенные подстановки Тажири и строим такие решения для нелинейного уравнения Клейна-Гордона на плоскости.

Магнитные свойства ансамбля обездвиженных суперпарамагнитных наночастиц с ориентированными осями легкого намагничивания

Чернышов А.В.¹, Закинян А.Р.¹, Куникин С.А.¹

¹Северо-Кавказский федеральный университет

Электронная почта ответственного автора: andreyrwm@gmail.com

В последние годы магнитные наночастицы привлекли значительное внимание благодаря своим уникальным магнитным свойствам, которые делают их очень полезными в различных приложениях. Среди них суперпарамагнитные наночастицы (СПМНЧ) представляют особый интерес из-за их высокой намагниченности и отсутствия магнитного гистерезиса. Одним из направлений исследований, вызвавших значительный интерес, являются магнитные свойства ансамбля зафиксированных СПМНЧ с ориентированными осями легкого намагничивания [1].

В данном исследовании были экспериментально изучены магнитные свойства материала, полученного путем внедрения СПМНЧ в полимерную матрицу на основе эпоксидной смолы. В последующем образец помещался в сферическую кювету и полимеризовался в разном по величине однородном внешнем магнитном поле, которое влияет на ориентацию и распределение магнитных моментов наночастиц. Полученный материал обладает анизотропными магнитными свойствами, которые и были предметом рассмотрения данной работы. В зависимости от ориентации намагничивающего измерительного поля изменяется магнитный момент всего образца, так при ориентации поля параллельно осям легко намагничивания магнитные моменты частиц предпочтительно выровнены вдоль направления поля, что сильно увеличивает намагниченность, для случая, когда поле перпендикулярно магнитные моменты удерживаются легкими осями и намагниченность уменьшается (Рис. 1).

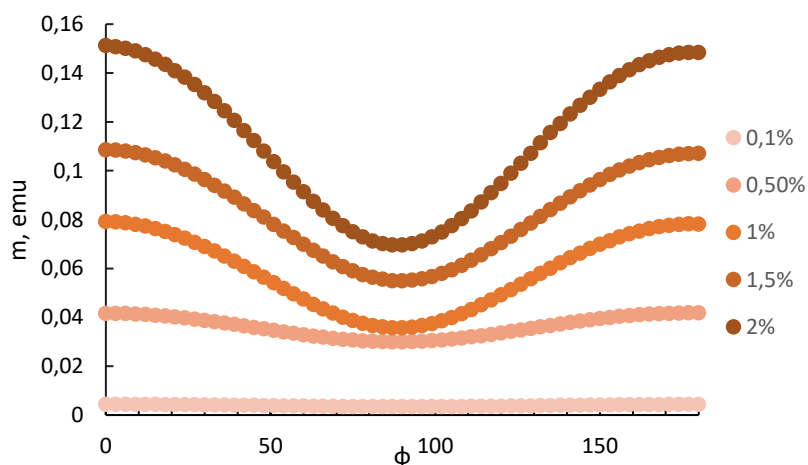


Рисунок 9. Магнитный момент от угла поворота образцов разных концентраций при одном поле полимеризации

[1] A.Y. Solovyova, E.A. Elfimova, A.O. Ivanov, Phys. Rev. E, 104 (2021) 064616

Композитные магнитные НЧ на основе переходных металлов в постоянном и переменном магнитных полях

Шабалкин И.Д.¹, Кривошапкин П.В.¹

¹Университет ИТМО, Химико-Биологический кластер, Energy Lab
Электронная почта ответственного автора: krivoshapkin@scamt-itmo.ru

За последние два десятилетия в научном обществе резко вырос интерес к магнитным наночастицам (МНЧ). В частности, МНЧ с иерархической и композитной структурой занимают особое место. В первую очередь это связано с возможностью комбинации нескольких свойств в одной универсальной НЧ или усиления определенного свойства за счет тонкой настройки форм и размеров.

В качестве одной из исследуемых системы была выбрана композитная структура, состоящая из ядра $ZnFe_2O_4$ и оболочки из $MnFe_2O_4$. Предполагается, что изменение структуры, морфологии и толщины оболочки позволят варьировать свойств системы (температура блокировки, намагниченность насыщения, размер, время релаксации T_1 и T_2). Композитные НЧ были синтезированы двухстадийным гидротермальным методом, что позволило контролируемо нанести оболочку $MnFe_2O_4$ различной толщины [1].

Другим объектом нашего исследования являются полые МНЧ $FeCo$. Высокая площадь поверхности, химический состав и наноразмерность делают данный материал привлекательным для электрокаталитического приложения. Кроме того, $FeCo$ обладает одной из наиболее высоких намагниченностей насыщения среди оксидов и сплавов переходных металлов. Это позволяет расценивать МНЧ $FeCo$ как эффективный агент для спиновой поляризации промежуточных радикалов для увеличения плотности тока и селективности электрохимических реакций.

Характеризация МНЧ проводилась при помощи рентгенофазового, микроструктурного, магнитного анализов. Для композитов на основе ферритов Zn и Mn , были сделаны фантомные МРТ-изображения НЧ в T_1 и T_2 режимах, продемонстрировавшие способность частиц контрастировать в двух режимах. Экспериментально и теоретически была оценена способность разогреваться во внешнем переменном магнитном поле ($SAR_{теор}=8.9$ W/g, $SAR_{прак}=9.3$ W/g). Для полых НЧ $FeCo$ была оценена электрокаталитическая активность в постоянном магнитном поле 0.4Т.

Список литературы:

- [1] I.D. Shabalkin, A.S. Komlev, S.A. Tsymbal, et al., Multifunctional tunable $ZnFe_2O_4@MnFe_2O_4$ nanoparticles for dual-mode MRI and combined magnetic hyperthermia with radiotherapy treatment, J. Mater. Chem. B 11 (5) (2023) 1068–1078.

Численный расчет времени работы магнитожидкостного уплотнения с неподвижным валом

Шарина С.Г.¹, Краков М.С.²

¹БГУ, Минск, Беларусь

²БНТУ, Минск, Беларусь

sonia-sharina@yandex.by

Магнитожидкостное уплотнение (МЖУ) – устройство, применяемое для герметизации вращающихся частей механизмов. Его основным рабочим компонентом является магнитная жидкость, которая разделяет две среды [1]. При эксплуатации МЖУ может долгое время находиться в режиме, когда вал остается неподвижным. В результате под действием высокоградиентного магнитного поля в зазоре под полюсным наконечником может образоваться плотная упаковка магнитных частиц. Это может привести к проблемам в работе МЖУ. Целью данной работы является определение времени образования плотной упаковки магнитных частиц в зазоре МЖУ.

Процессы диффузии и магнитофореза, происходящие в магнитной жидкости, описываются уравнениями магнитостатики и диффузии, где для коэффициента диффузии используется приближение для системы твердых сфер идеальной магнитной жидкости [2], в которой можно пренебречь диполь-дипольным взаимодействием и силой тяжести. Задача решается численно методом контрольных объемов на треугольной сетке с помощью явной схемы [3].

Определено распределение концентрации под треугольным полюсным наконечником (рис. 1). Установлено, что в больших полях возможно достижение плотной упаковки частиц при некотором критическом значении напряженности магнитного поля (рис. 2). Рассчитано время достижения установившейся концентрации.

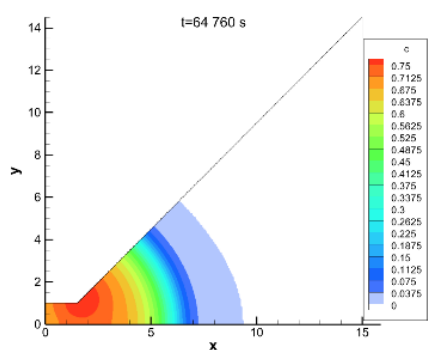


Рисунок 10 – Распределение концентрации частиц под полюсом МЖУ. $t = 64760$ с.

Список литературы:

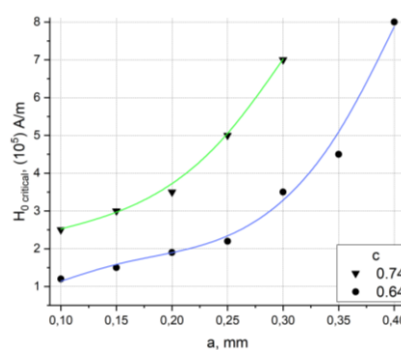


Рисунок 2 – Зависимость критической напряженности от размера зазора.

- [1] Aswathy, J. Ferrofluids: Synthetic Strategies, Stabilization, Physicochemical Features, Characterization, and Applications / J. Aswathy, M. Suresh // ChemPlusChem. — 2014. — Vol. 79, no. 10. — Pp. 1382–1420.
- [2] Carnahan, N. Equation of state for nonattracting rigid spheres. / N. Carnahan, K. Starling J. // Chem. Phys. — 1969. — Vol. 51, no. 2. — Pp. 635–636.
- [3] Krakov, M. S. Control volume finite-element method for Navier-Stokes equations in vortex-streamfunction formulation / M. S. Krakov // Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals. — 1992. — Vol. 21, no. 2. — Pp. 125–145.

Оценка эффективности применения комбинации магнитомягких и магнитотвёрдых материалов при создании магнитных систем различного применения

Яковлев А.С.¹, Молчанов С.В.¹, Чижма С.Н.², Савин В.В.¹

¹ ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

² Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия.

Электронная почта ответственного автора: asyakovlev@stud.kantiana.ru

В работе рассматривается комбинационный подход к созданию магнитных элементов различных систем, заключающийся в их создании с использованием магнитотвёрдых и магнитомягких в определённой конфигурации, позволяющей применить их более эффективно, а также уменьшить содержание дорогостоящих магнитотвёрдых материалов. На основе математической модели (Рис. 1) производится оценка эффективности такого подхода путём сравнения результатов для различных конфигураций.

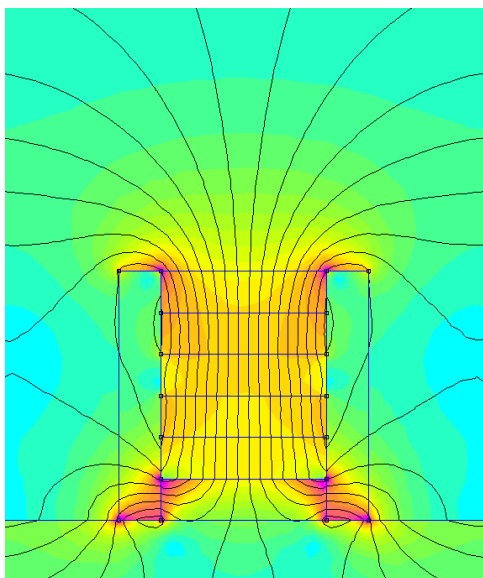


Рисунок 11 – Визуализация результатов моделирования одной из предложенных конфигураций

Актуальность исследования обусловлена необходимостью в создании новых более эффективных и рациональных решений в области магнитных систем на основе постоянных магнитов, в условиях быстрого развития и роста производства электрических машин и устройств, их использующих. Наличие современных технологий изготовления постоянных магнитов, например методом порошковой металлургии [1], позволяет применить результаты исследования на практике

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20157 (<https://rscf.ru/project/22-19-20157/>) и гранта в форме субсидии из бюджета Калининградской области №06-С/2022.

[1] Производство материалов методом порошковой металлургии. Магнитные материалы. URL: <https://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/poroshkovaya-metallurgiya/675-magnitnye-materialy.html>

Авторский указатель

Акино Р.....	31	Меркулов Д.И.....	25
Алехина Ю.А.....	4	Мершиев И.Г.....	26
Амбаров А.В.....	11	Митрофанов Т.А.....	27
Амиров А.А.....	17	Молчанов С.В.....	41
Ананич А.Н.....	12	Мурзин Д.В.....	5, 17
Антипова В. Н.....	13	Мусихин А.Ю.....	28
Бакланов В.Д.....	30	Наджарьян Т.А.....	29
Беляев В.К.....	5	Налетова В.А.....	14, 25
Виноградова А.С.....	14	Нестеров С.А.....	30
Воронцов П.А.....	17	Омельянчик А.С.....	13, 17, 21, 31, 35
Воронцов С. А.....	13	Панина Л.В.....	7
Воронцов С.А.....	17	Пелевина Д.А.....	14, 25
Вурмель С.....	26	Перов Н.С.....	4
Гомес да Силва Ф.....	31	Погосян Э.К.....	32
Гомиде Г.....	31	Пущина М.В.....	15
Гриценко К.А.....	27	Пшеничников С.Е.....	31
Грунин А.А.....	5	Радушнов Д.И.....	33
Депейрот Ж.....	31	Райхер Ю.Л.....	8
Добросердова А.Б.....	15	Родионов В.В.....	17
Домингос К.....	31	Родионова В.В.....	4, 5, 13, 17, 21, 31, 35
Елфимова Е.А.....	11, 16, 18, 33, 34	Розенберг М.....	20
Ершов П.А.....	17	Русанов М.С.....	34
Закинян А.Р.....	22, 36, 38	Савин В.В.....	32, 41
Зверев В.С.....	11, 18, 19, 34	Сальников В.Д.....	17, 35
Зубарев А.Ю.....	28	Семенова С.А.....	36
Иванов А.О.....	6, 16, 18, 19	Сергеев Е.Д.....	17
Исаев Д.А.....	4	Соболев К. В.....	13
Кабрейра Гомес Р.....	31	Согомонян К.Л.....	14
Канторович С.С.....	15, 20, 24	Сокольский С.А.....	16
Козенкова Е.И.....	21	Соловьева А.Ю.....	16, 33
Колесникова В.Г.....	4, 27	Стасюк И.О.....	32
Кононенко Д.В.....	22	Степанов Г.В.....	28
Костров С.А.....	23	Столбов О.В.....	9
Краков М.С.....	12, 40	Трунин А.С.....	37
Крамаренко Е.Ю.....	4, 23, 29	Туркин С.Д.....	36
Кривошапкин П.В.....	39	Турков В.А.....	25
Кузнецов А.А.....	24	Федянин А.А.....	5
Куникин С.А.....	38	Чернышов А.В.....	38
Куприянова Г.С.....	26	Чижма С.Н.....	41
Левада Е.В.....	13, 31	Шабалкин И.Д.....	39
Луис Ф.....	31	Шарова О.А.....	14
Макарова Л.А.....	4	Яковлев А.С.....	41
Макарьин Р.А.....	4		