

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
Кафедра Материаловедения и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В.И. Темных

(подпись)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**Направление:** 22.03.01 Материаловедение и технология материалов

**Профиль:** 22.03.01.07 материаловедение и технологии материалов в  
машиностроении

**Исследование свойств микротрубок кобальта в поликарбонатной  
мембране как композиционного материала**

Научный руководитель

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

С.В. Комогорцев

Выпускник

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

А.Х. Нумонов

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

Л.А. Свечникова

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический Институт  
Кафедра «Материаловедение и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.И. Темных  
подпись  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

Студенту Нумонову Ахаджону Хабибовичу.

Группа МТ16-01Б. Направление (специальность) 22.03.01

«Материаловедение и технологии обработки материалов».

Тема работы: «Исследование свойств микротрубок кобальта в поликарбонатной мембране как композиционного материала».

Утверждена приказом по университету № 21639/с от 27.12.2019 г.

Руководитель ВКР: С.В. Комогорцев, профессор, д. ф-м. н., кафедры МиТОМ.

Исходные данные: научные публикации (список используемых источников), образцы микротрубок Co (P), программный пакет для микромагнитного моделирования ООММФ (открытый код).

Перечень разделов ВКР: аннотация, реферат, введение, обзор литературы по проблеме, методы изготовления образцов и их исследования, экспериментальные исследования и их обсуждение, заключение, список источников.

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_

подпись

С.В. Комогорцев

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_

подпись

А.Х. Нумонов

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

## АННОТАЦИЯ

На сегодняшний день актуально получение новых магнитных частиц, обладающих уникальными свойствами для применения их в диагностике и терапии. Частицы в форме магнитных трубок, формируемые осаждением магнитного материала на стенки линейных пор материала носителя, например, пористого кремния или пористых мембран являются ярким примером таких материалов. Поэтому отработка технологий получения и исследование частиц в форме магнитных трубок в последние годы становится все более актуальной.

Данная работа посвящена получению частиц в форме ферромагнитных микротрубок в пористой матрице и исследованию магнитных характеристик этого материала.

В работе отработаны режимы химического осаждения ферромагнитных трубок в матрицы поликарбонатных мембран, то есть, создана дешевая и легко масштабируемая на большие объемы производства технология получения этого нового композиционного материала. Магнитные частицы  $\text{Co (P)}$  в форме микротрубок сочетают значительный отклик в больших магнитных полях и устойчивость к слипанию частиц в малых полях. Эта особенность перспективна для создания магнитных коллоидов для биомедицинских приложений.

Ключевые слова: Кобальтовые микротрубки, микромагнитное моделирование, петля гистерезиса, замыкание магнитного потока.

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа по теме «Исследование свойств микротрубок кобальта в поликарбонатной мембране как композиционного материала», содержит 39 страниц, 2 таблицы, 16 рисунков, 3 формулы и 40 использованных источника.

Цель работы:

Получение частиц в форме ферромагнитных микротрубок в пористой матрице и исследование магнитных характеристик этого материала.

Задачи:

1 Получение ферромагнитных трубок Co (P) в пористые поликарбонатные мембраны методом химического осаждения;

2 Экспериментально и численно исследовать кривые намагничивания полученных композиционных материалов.

В результате в данной работе выполнено получение частиц в форме ферромагнитных микротрубок в пористой поликарбонатной матрице и исследованы магнитные характеристики этого материала. На основании проведенных исследований установлено следующее. Ферромагнитный микро- либо нано-элемент в форме трубки способствует замыканию магнитного потока внутри элемента в малых полях и, следовательно, к устранению диполь-дипольного взаимодействия между частицами. Таким образом, использование магнитных частиц в форме трубок дает уникальное сочетание прикладных характеристик для применений в биомедицине: высокая намагниченность и высокая анизотропия формы, сочетаются с возможностью резкого ослабления магнитного диполь-дипольного взаимодействия между элементами в небольших полях.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Обзор литературы .....	9
2 Методы изготовления образцов и их исследование.....	16
2.1 Методы изготовления частиц в форме микро и нанотрубок.....	16
2.2 Методы исследования .....	18
3 Экспериментальные исследования и их обсуждение.....	24
3.1 Микротрубки кобальта. Получение и микроскопические исследования .....	24
3.2 Кривые намагничивания и магнитная анизотропия микротрубок .....	27
3.3 Численный эксперимент, анализ свойств и перспектив применения магнитных микротрубок.....	29
Заключение .....	33
Список использованных источников .....	34

## ВВЕДЕНИЕ

На настоящем этапе развития современных технологий актуальна проблема создания и применения новых материалов, как для микроэлектроники и микросистемной техники, так и для применения в биомедицине. Для биомедицины большое внимание сейчас уделяется поиску и созданию частиц с новыми улучшенными электрическими, магнитными свойствами. В частности, актуально получение новых магнитных частиц, обладающих уникальными свойствами для применения их в диагностике и терапии. Частицы в форме магнитных трубок, формируемые осаждением магнитного материала на стенки линейных пор материала носителя, например, пористого кремния или пористых мембран являются ярким примером таких материалов. Поэтому отработка технологий получения и исследование частиц в форме магнитных трубок в последние годы становится все более актуальной.

Целью данной работы является получение частиц в форме ферромагнитных микротрубок в пористой матрице и исследование магнитных характеристик этого материала.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- 1 Получение ферромагнитных трубок  $\text{Co (P)}$  в пористые поликарбонатные мембраны методом химического осаждения;
- 2 Экспериментально и численно исследовать кривые намагничивания полученных композиционных материалов.

Научная новизна. Впервые химическим осаждением на стенки пор поликарбонатных мембран получены микротрубки пересыщенных твердых растворов  $\text{Co (P)}$ . Численно и экспериментально исследована магнитная анизотропия частиц в форме микротрубки. Показано, что форма микротрубки приводит к замыканию магнитного потока внутри частицы в малых магнитных полях.

Отработанные режимы химического осаждения ферромагнитных трубок в матрицы поликарбонатных мембран позволят создать дешевую и легко масштабируемую на большие объемы производства технологию получения этого нового

композиционного материала. Магнитные частицы Co (P) в форме микротрубок сочетают значительный отклик в больших магнитных полях и устойчивость к слипанию частиц в малых полях. Эта особенность перспективна для создания магнитных коллоидов для биомедицинских приложений.



## 1 Обзор литературы по проблеме

Требования к технологии получения и к материалу магнитных частиц для применений в биомедицине.

Универсальное средство усиления энергетического действия магнитного поля (МП) на биохимическую систему – введение в нее магнитных наночастиц. Практически любые используемые в биомедицине магнитные наночастицы (МНЧ) с радиусом магнитного ядра значительно меньше 100 нм являются однодоменными, т. е. спонтанно магнито упорядоченными и в первом приближении однородно намагниченными до насыщения вдоль направления легкого намагничивания в кристаллической решетке. Однако следует отметить, что в силу различных причин (в частности, из-за поверхностных эффектов) с уменьшением размеров (МНЧ) возникают отклонения от однородности намагниченности, понижающие ее результирующий магнитный момент  $\mu$ , приведенный к массе. При дальнейшем уменьшении  $R_m$  (МНЧ) переходят в суперпарамагнитное состояние, т. е. начинают хаотически перемагничиваться под действием тепловых флуктуаций, оставаясь внутренне магнито-упорядоченными. С физической точки зрения наличие однодоменных (МНЧ) в магнитонеупорядоченной среде (водном растворе или ткани организма) приводит к сильнейшей локализации действия внешнего магнитного поля (МП). Таким образом, (МНЧ) на время своего пребывания в организме становятся основными первичными мишенями для влияния (МП), обеспечивая высокую чувствительность системы к внешним магнитным стимулам. МНЧ на много порядков величины усиливают действие (МП) и локализуют его в окрестности своего расположения в нанометровой шкале. Это позволяет локально повысить интенсивность воздействия и снизить частоту и величину необходимой индукции переменного магнитного поля (ПМП), а, следовательно, уменьшить вероятность нежелательных побочных эффектов со стороны поля. Будучи объектом молекулярных размеров, (МНЧ) снабженные функциональными молекулами, способны проникать в любые ткани и клетки и сделать абсолютно ясными мишени, возможные каналы и механизмы действия (ПМП) на

биохимическую систему на молекулярном уровне. Магнитные нано частицы в чистом виде не могут быть применены даже в простейших биохимических или медицинских приложениях. Как правило, их функционализируют, покрывая одной или несколькими оболочками. Они предохраняют (МНЧ) от окисления и деградации, придают им гидрофильные свойства, предотвращают самоагрегирование, понижают цитотоксичность. Помимо этого, (МНЧ) снабжают различными функциональными молекулами активного терапевтического агента (ТА) или диагностикума, молекулами для селективного прикрепления к намеченным молекулярным мишеням и/или облегчающими проникновение функционализированных МНЧ (ф-МНЧ) через клеточную мембрану. Функционализация МНЧ, адекватная поставленной задаче, способна обеспечить необходимую молекулярную локальность и селективность их действия. Для магнитной тераностики к настоящему времени разработаны и применяются главным образом ф-МНЧ трех типов: единичные МНЧ, покрытые различными лигандами (обычно с гидродинамическим радиусом ( $RHD$ ) до 100 нм); нанокапсулы (например, липосомы, экзосомы) с  $RHD$  около 100–300 нм, содержащие МНЧ; и высокопористые частицы-матрицы из различных биосовместимых материалов (полимерные дендримеры, наногели, мезопористые керамики) с  $RHD$  около 200–5000 нм, также содержащие МНЧ [5].

Хорошо известно, что на любой объект, обладающий магнитным моментом  $\mu$ , в однородном МП с индукцией  $B$  действует вращающий момент  $L = \mu \times B$ , а в неоднородном – в дополнение к нему еще и сила  $F$  пропорционально  $\mu \cdot grad B$  (рис. 1).

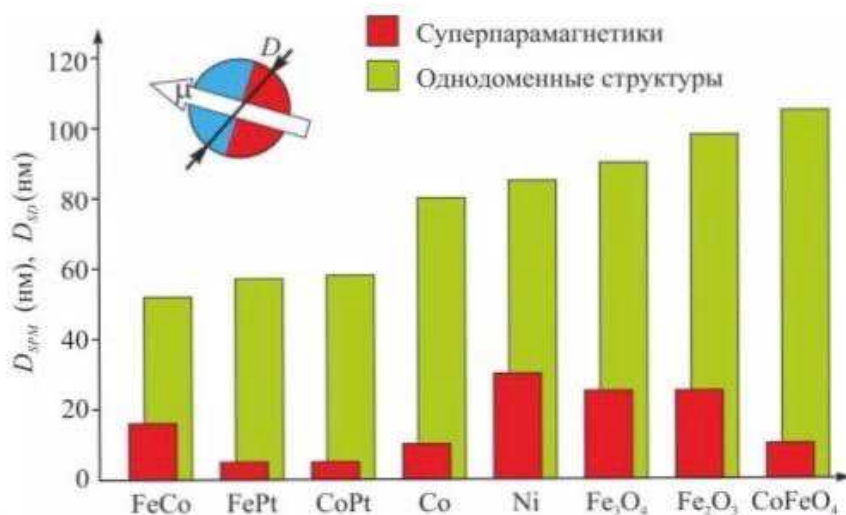


Рисунок 1 – Расчетные величины критических размеров МНЧ

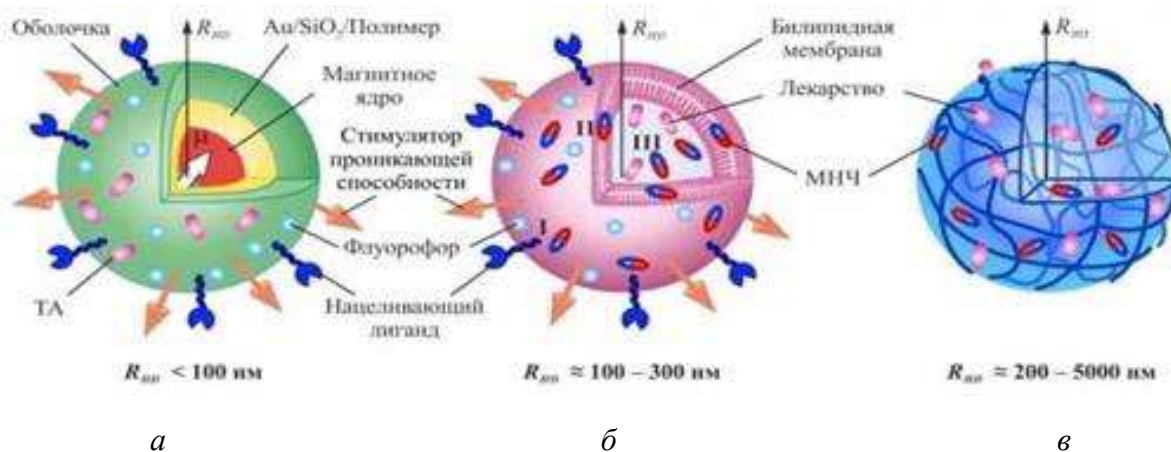


Рисунок 2 – Типичные представители трех основных классов функционализированных магнитных частиц для различных биомедицинских приложений с указанием интервала типичных значений гидродинамического радиуса:

*a* – одиночная МНЧ; *б* – капсула с оболочкой; *в* – мезопористая матрица

В ПМП эти момент и сила осциллируют, в результате чего МНЧ в первом случае могут прийти во вращательно-колебательное движение, а во втором – еще и в поступательно-колебательное. Амплитуда угла, заметаемого частицей при вращении, зависит от ее магнитного момента, гидродинамического радиуса, момента инерции, вязкости окружающей среды и жесткости внешних связей (если они есть), а также амплитуды и частоты ПМП [6].

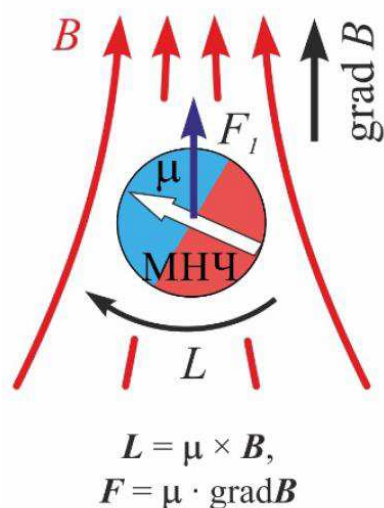


Рисунок 3 – Момент и сила, действующие на МНЧ

Анизометрические МНЧ (в частности, стержнеобразные или составленные из  $n$  сферических) имеют ряд преимуществ перед сферическими. При наличии внешнего ПМП такой «наноскальпель» может развивать локальное давление на мембрану или клеточные органеллы в области одного из своих концов для частиц магнетита в поле 100 мТл около  $10^5$ – $10^6$  Па. Такое воздействие может существенно нарушить биологические функции мембраны и привести к гибели клетки. Это может быть использовано в целях контролируемого селективного умерщвления больных клеток в составе злокачественных образований в онкологической безлекарственной терапии.

Более подробно модели взаимодействия сферических МНЧ с биомолекулами и молекулярными биоструктурами описаны в [1–4], а несферических (в частности, стержнеобразных и Янус-частиц) – в [5, 6]. В [7, 8] представлено несколько моделей контролируемого высвобождения лекарственных ММ из полимерной шубы за счет магнитогидродинамического (МГД) вымывания при вращательно-колебательных осцилляциях МНЧ в низкочастотном МП.

**Размер частиц и магнитный момент.** Чем больше объем однородно намагниченной частицы, тем больше ее магнитный момент. Большой магнитный момент важен при магнитомеханическом воздействии. Однако ограничения раз-

мера частиц (а, следовательно, и магнитного момента) сверху дают размеры кровеносных сосудов человека (см. таблицу 1), поскольку частицы должны свободно проходить через них.

Для увеличения магнитного отклика важен удельный магнитный момент - намагниченность. Для магнитомеханического отклика важна также форма частицы. В предыдущем пункте указано, что анизометрические частицы (частицы вытянутой формы предпочтительнее чем сферические частицы.

Таблица 1 – Примерные количественные характеристики отдельных сосудов в системе кровообращения [9]

Сосуд	Диаметр, мм	Длина, мм	Толщина стенки, мкм	Давление, мм рт. ст.
Аорта	25	400	1500	100
Крупные артерии	6,5	200	1000	100
Главные артериальные ветви	2,4	100	800	95
Терминальные артериальные ветви	1,2	10	125	90
Артериолы	0,1	2	20	60
Капилляры	0,008	1	1	30
Венулы	0,15	2	2	20
Терминальные венулы	1,5	10	40	15
Главные венозные ветви	5	100	500	15
Крупные вены	14	200	800	10
Полая вена	30	400	1200	5
Камеры сердца				120

Примечание: Приведены данные для 30-летнего мужчины массой 70 кг с объемом циркулирующей крови 5,4 л.

Однако требование усиления магнитного момента частицы вступает в противоречие с требованием предотвращения агрегации частиц. Частицы с большим

магнитным моментом являются источниками неоднородного магнитного поля. Это поле действуя на соседние частицы способствует агрегации частиц. В этой работе мы покажем, как создавая частицы нужной формы можно преодолеть это противоречие [9].

Важным требованием является также нетоксичность частиц и возможность вывода их из организма. В предыдущем разделе мы коротко коснулись этого вопроса. Однако эти вопросы требуют дополнительных масштабных исследований и в данной работе не рассматриваются.

**Магнитные частицы в форме микро и нанотрубок.** Особенность частицы выполненной в виде трубки можно описать следующим образом. Подавляющее большинство типов искусственных микро и наночастиц имеют форму близкую к сферической и, таким образом, характеризуются единственным размером (средним радиусом). Трубка представляет собой полый цилиндрический объект, для описания которого необходимо задать три независимых размера: длина  $L$ , внешний  $R$  и внутренний  $a$  радиусы (рис. 4).

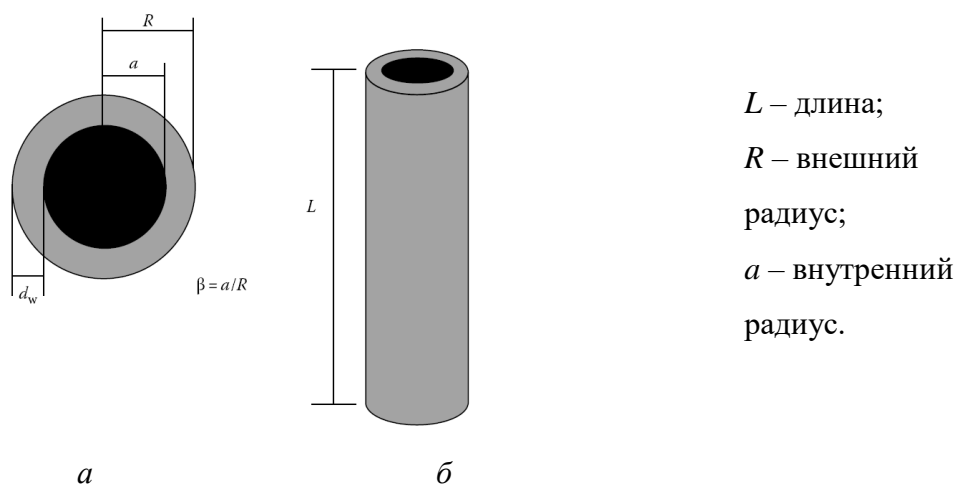


Рисунок 4 – Геометрические параметры частицы в форме трубки:

$a$  – вид сверху;  $b$  – вид с боку

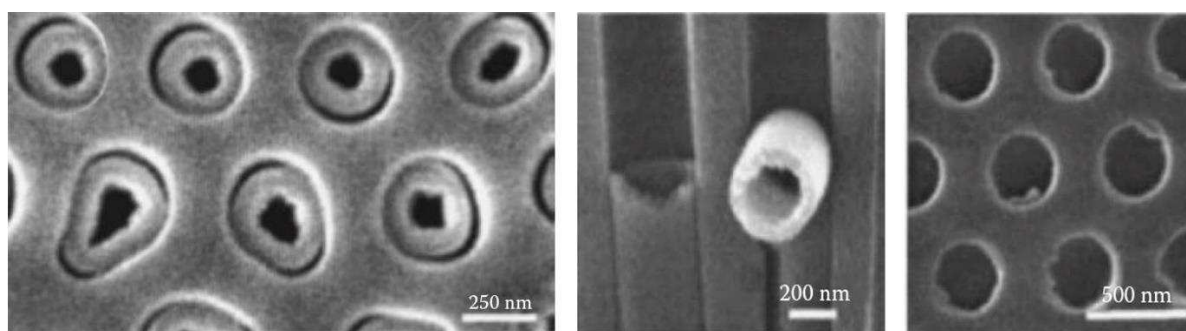
Частица в виде магнитной нанотрубки может доставляться и управляться внешним магнитным полем. Эта особенность может быть использована и в электронике, и в биомедицине [10].

Преимущества частицы в виде трубки в сравнении с частицей в форме палочки следующие: трубка имеет большую площадь поверхности, легче переманивается, а отсутствие сердцевинки уменьшает ее удельный вес, что может быть использовано для управления флотацией этих частиц.

## 2 Методы изготовления образцов и их исследование

### 2.1 Методы изготовления частиц в форме микро и нанотрубок

Известно несколько подходов к изготовлению микро и нанотрубок. Например, использование мембран пористого оксида алюминия  $Al_2O_3$  в качестве шаблонов для осаждения из раствора. Также в качестве шаблонов для электроосаждения и химического осаждения используют поликарбонатные мембраны с диаметрами пор от 50 нм до 2 мкм, длиной поры от 6 до 10 мкм, поверхностной плотностью пор около  $10^8$  пор/см<sup>2</sup>. Кроме того используются также шаблоны на основе пористого кремния.



*а*

*б*

*в*

Рисунок 5 – Изображения, полученные в растровом электронном микроскопе, кобальтовых трубок, осажденных в пористую мембрану  $Al_2O_3$ :

*а* – кобальтовая трубка в масштабе 250 нм; *б* – кобальтовая трубка в масштабе 200 нм;

*в* – кобальтовая трубка в масштабе 500 нм

Основная идея для приготовления трубок состоит в нанесении кобальтового покрытия на внутреннюю поверхность поликарбонатной мембраны с диаметром пор 500 нм. Существуют несколько способов химического осаждения металлических покрытий из водных растворов:

- контактный;
- контактно-химический;
- метод химического восстановления.

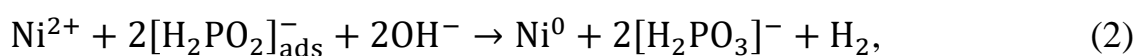
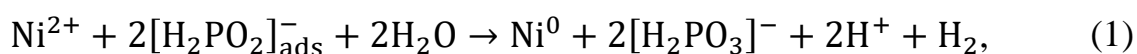


Контактно–химический способ осаждения металлов заключается в создании гальванической пары между металлом основы и более активным металлом. Так, при осаждении серебра на медную основу создают гальваническую пару с помощью более активного металла алюминия или магния. В этом случае более активный металл отдает свои электроны меди и на отрицательно заряженной медной поверхности ионы  $Ag^+$  восстанавливаются до металла. Рассмотренный процесс используют при нанесении серебряного покрытия на волноводные трубы и изделия сложной конфигурации из меди и ее сплавов [11].

Метод химического восстановления (химическая металлизация) заключается в том, что металлические покрытия получают в результате восстановления ионов металла из водных растворов, содержащих восстановитель.

Метод химического восстановления металлов с использованием восстановителей, в частности гипофосфита, позволяет получать покрытия сплавов на основе Ni, Co и т. д. любой толщины и на подложку любой конфигурации. Этот метод основан на реакции восстановления переходных металлов из растворов соответствующих солей. В качестве восстановителя используются такие соединения как гипофосфит, боргидрид, гидразин. В данной работе для получения экспериментальных образцов использовалась реакция восстановления металла с помощью гипофосфита.

Гипофосфит – соль одноосновной фосфорноватистой кислоты, например,  $NaH_2PO_2$  – является сильным восстановителем, способным восстанавливать ионы многих металлов. Суммарную реакцию восстановления ионов никеля гипофосфитом можно представить в виде следующих уравнений (на примере восстановления никеля):



Отметим, что в полученных металлических осадках всегда определяется примесь фосфора. Химическое восстановление металлов является автокаталитической реакцией, так как металлическая пленка, образовавшаяся в начальный период, катализирует дальнейшую реакцию восстановления этого же металла. Но для начальной стадии восстановления металла необходимо, чтобы покрываемая поверхность проявляла каталитические свойства по отношению к этой реакции. Такими свойствами обладают главным образом металлы *d*-элементов VIII группы и некоторые другие металлы.

Металлы медь, вольфрам, титан, а также неметаллические материалы не являются катализаторами реакции окисления восстановителя. Поэтому для придания каталитических свойств поверхности ее подвергают специальной обработке – активации [12].

Существуют различные способы активации, сущность которых заключается в нанесении металла–катализатора на покрываемую поверхность. Наиболее распространенный способ активации включает две последовательные операции, получившие название "сенсбилизирование" и "активирование". Сенсбилизирование (повышение чувствительности) заключается в обработке поверхности раствором солей  $\text{Sn}_2^+$ ,  $\text{Fe}_2^+$ ,  $\text{Ti}_3^+$ ,  $\text{Ge}_2^+$ .

В работе предполагается провести осаждение пленок Co–P. Пленки будут химически осаждены на поверхность пор поликарбонатных мембран, поверхность которых будет подвергнута активированию в растворах  $\text{PdCl}_2$  и  $\text{SnCl}_2$ . Для химического осаждения предполагается использовать растворы следующих составов:

$\text{CoSO}_4 = 25$  г/л;  $\text{HOC}(\text{CH}_2\text{COONa})_2\text{COONa} = 90$  г/л;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 25$  г/л;  
 $\text{NaH}_2\text{PO}_2 = 20$  г/л. Температура в термостате  $85$  °С.

## 2.2 Методы исследования

**Вибрационный магнитометр.** Вибрационный магнитометр состоит из намагничивающего устройства (1), механической или электромагнитной

систем (2), осуществляющих периодические колебания образца (3) в однородном магнитном поле, измерительных катушек (4) (см. рис. 6).



Рисунок 6 – Блок-схема вибрационного магнитометра

Катушки включаются последовательно, навстречу друг другу. При таком включении полезный сигнал, пропорциональный магнитному моменту образца, складывается; паразитный (уровень сигнала в приборе составляет 0,1 В), обусловленный нестабильностью внешнего поля - вычитается, что приводит к увеличению отношения сигнал/шум. Электродвижущая сила  $\varepsilon$ , возникающая в катушке при колебании образца, измеряется вольтметром, а поле  $H$  в намагничивающем устройстве – датчиком Холла.

Градуировка установки проводилась по эталонному образцу, магнитные свойства которого хорошо изучены. В качестве эталонного образца использовался чистый поликристаллический никель.

Высокая точность измерений и высокая чувствительность позволяют проводить измерения на образцах малого размера. Погрешность измерений абсолютных значений намагниченности составляет 3 %, а относительных значений  $M_s/M - 0,1$  %. Минимальный магнитный момент, регистрируемый прибором  $M = 5 \cdot 10^{-5}$  Гс·см<sup>3</sup>.

Для измерения кривых намагничивания в данной работе использовался прибор: Вибрационный магнитометр 7407 VSM Производитель: *Lake Shore Cryotronics*, США. Прибор предназначен для измерения магнитного момента объёмных и плёночных образцов. Основные характеристики: чувствительность  $10^{-7}$  ед. Величины измеряемого магнитного момента от  $10^{-7}$  до 1000 ед. Диапазон температур 4,2–1300 К. Напряжённость магнитного поля до 23 кЭ. Для наших исследований важно то, что в этом приборе предусмотрено вращение образца.



Рисунок 7 – Вибрационный магнитометр 7407 VSM *Lake Shore Cryotronics*

**Растровый электронный микроскоп.** В данной работе также использован растровый электронный микроскоп (РЭМ) Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КИЦ СО РАН. Этот сканирующий электронный микроскоп сверхвысокого разрешения *Hitachi S5500* предназначен для получения изображения объекта с высоким (до 0,4 нм) пространственным разрешением, также информации о составе, строении и некоторых других свойствах приповерхностных слоёв. Основан на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым объектом [14].

Современный РЭМ позволяет работать в широком диапазоне увеличений приблизительно от 3–10 крат (то есть эквивалентно увеличению сильной ручной

линзы) до 1 000 000 крат, что приблизительно в 500 раз превышает предел увеличения лучших оптических микроскопов.

Разрешающая способность (способность различать тонкие детали) оптического микроскопа ограничена длиной волны фотонов видимого света. Наиболее мощные оптические микроскопы могут обеспечить наблюдение деталей с размером 0.1–0.2 мкм. Если мы захотим увидеть более тонкие детали, необходимо сократить длину волны, которая освещает объект исследования. Для этого можно использовать не фотоны, а, например, электроны, длина волны которых намного меньше. Электронные микроскопы – результат воплощения этой идеи. Электронный пучок направляется на анализируемый образец. В результате взаимодействия генерируются низкоэнергетичные вторичные электроны, которые собираются детектором вторичных электронов. Интенсивность электрического сигнала детектора зависит как от природы образца (в меньшей степени), так и от топографии (в большей степени) образца в области взаимодействия. Таким образом возможно получить карту рельефа проанализированной зоны.

Тонкий электронный зонд генерируется электронной пушкой, которая играет роль источника электронов, и фокусируется электронными линзами (обычно электромагнитными, иногда электростатическими). Сканирующие катушки отклоняют зонд в двух взаимно перпендикулярных направлениях, сканируя поверхность образца зондом, подобно сканированию электронным пучком экрана электронно-лучевой трубки телевизора. Источник электронов, электронные линзы (обычно тороидальные магнитные) и отклоняющие катушки образуют систему, называемую электронной колонной. В современных РЭМ изображение регистрируется в цифровой форме [14].

Микроскоп *Hitachi S5500* предназначен для получения изображения во вторичных электронах от  $\times 100$  до  $\times 2\,000\,000$ , что востребовано при исследовании формы микрообразцов. Разрешение прибора 0,4 нм (ускоряющее напряжение: 30 кВ, высота образца 1 мм, увеличение  $\times 800\,000$ ); 1,6 нм (ускоряющее напряжение: 1 кВ, высота образца 2 мм, увеличение  $\times 180\,000$ ). Режим высокого увеличения: от  $\times 800$  до  $\times 2\,000\,000$ ; режим низкого увеличения: от  $\times 60$  до

$\times 10\ 000$ . Ускоряющее напряжение, используемое в приборе, варьируется ( $V_{acc}$ ): от 0,5 до 30 кВ (с шагом в 100 В). Размеры исследуемого образца: плоский образец  $5 \times 9,5 \times 3,5$  мм (высота) (по максимуму). Возможно исследование тонких срезов  $2 \times 6,5 \times 5$  мм.

**Микромагнитное моделирование.** Для визуализации распределения намагниченности в нано и микро-трубках использовался метод микромагнитного моделирования в программном пакете *The Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF)* [12]. Данная программа основана на модели сплошной среды разбитой на идентичные ячейки прямоугольной формы (рис. 8, а). В каждой ячейке задано направление намагниченности.

Приближение сплошной ферромагнитной среды справедливо, при линейных размерах ячейки разбиения меньше длины ферромагнитной корреляции. Полная магнитная энергия  $H_{tot}$  такой среды будет зависеть от распределения намагниченности в ячейках.

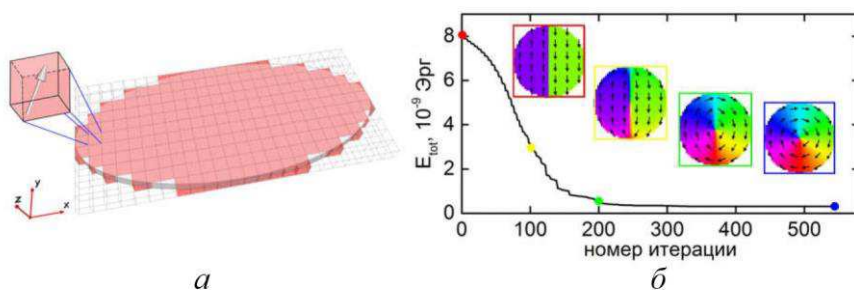


Рисунок 8 – Конфигурация намагниченности на итерациях:

а – разбиение диска ячейками в микромагнитном моделировании; б – график зависимости полной энергии для релаксации из двухдоменного состояния диска пермаллоя диаметром 600 нм и толщиной 40 нм

При расчете  $H_{tot}$  учитываются следующие вклады: энергии взаимодействия с внешним магнитным полем (энергия Зеемана), энергия магнитной анизотропии и энергия обменного взаимодействия. Крутящий момент, вызывающий динамику магнитного момента при минимизации суммы энергетических вкладов, описывается уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта [10]:

$$\frac{\Delta \vec{m}}{\Delta t} = -\gamma [\vec{m} * \vec{H}_{tot}] + \frac{\alpha}{M_s} [\vec{m} * \frac{\Delta \vec{m}}{\Delta t}], \quad (3)$$

где  $\gamma = \frac{ge}{2m_e c}$ ,  $g$  – множитель Ланде;

$e$  и  $m_e$  – заряд и масса электрона;

$c$  – скорость света;

$H_{tot}$  – результирующее магнитное поле представляющее сумму вкладов полей: обменного взаимодействия, магнитостатического взаимодействия, анизотропии, внешнего магнитного поля.

Распределение намагниченности с минимальной  $H_{tot}$  находится численным методом конечных разностей [11]. На каждой итерации (i) подворачивается намагниченность в одной из ячеек так, чтобы полная энергия системы уменьшалась. Итерации продолжаются до тех пор, пока полная энергия не достигнет минимального значения. На рис. 8, б приведен пример изменения энергии при релаксации намагниченности в пермалловом диске: вначале симуляций было задано двухдоменное состояние, в результате минимизации энергии в диске стабилизировался магнитный вихрь.

Из-за наличия локальных минимумов энергии, результаты микромагнитного моделирования могут быть некорректными. Поэтому их необходимо сравнивать с экспериментальными данными. В первую очередь оценивается соответствие интегральной характеристики процесса перемагничивания – петель гистерезиса, полученных экспериментально и моделированием, а также сопоставление рассчитанных спиновых конфигураций с изображениями Керровской микроскопии, либо магнитной силовой микроскопии.

### 3 Экспериментальные исследования и их обсуждение

#### 3.1 Получение и микроскопические исследования микротрубки кобальта

**Получение.** Получение трубок осуществлялось методом химического осаждения в термостате марки “УТИЖ-4”. В качестве матриц для химического осаждения использовались образцы поликарбонатных мембран с диаметрами пор от 0,5 мкм до 1 мкм. Осаждение проводилось в термостате при фиксированной температуре. Для осаждения ферромагнитных трубок Co (P) использовался раствор № 1 состав которого приведен на (табл.2) Температура водного раствора (табл.2)  $80,0 \pm 0,5$  °С. Процесс осаждения длился от 45 минут до 2 часов.

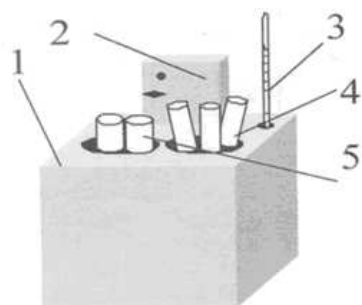
Таблица 2 – Состав водного раствора

Компоненты раствора	Количество раствора
CoSO <sub>4</sub>	25 г/л
Цитрат Na	90 г/л
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	42 г/л
Гипофосфит натрия	90 г/л
pH	от 8,2 до 8,6

Стакан с образцом пористой матрицы в дистиллированной воде помещается в ультразвуковую установку типа «УМ-4» и обрабатывается там 3 минуты.

Для осаждения Co (P) пористые матрицы предварительно были обработаны в растворе NaOH, с последующей промывкой их в дистиллированной воде. Затем данные образцы помещались в рабочий раствор в термостат (рис. 9), причем с одной стороны образца пористого кремния формировался контакт с помощью алюминиевой фольги с целью создания контактной разности потенциала.





- 1 – термостат с реактивами;
- 2 – блок терморегулирования;
- 3 – градусник для контроля температуры;
- 4 – пробирки с растворами;
- 5 – стаканы для промывки

Рисунок 9 – Схема термостата

**Микроскопические исследования.** Микроскопическое изображение поверхности пористой поликарбонатной мембраны (рис. 10) показывает, что поры имеют округлую форму, приблизительно одинаковый диаметр (для данного изображения 0,5 мкм), и хаотически распределены по поверхности мембраны. Оценка поверхностной плотности пор или площади поверхности, покрытой порами дает величину около 4 %.

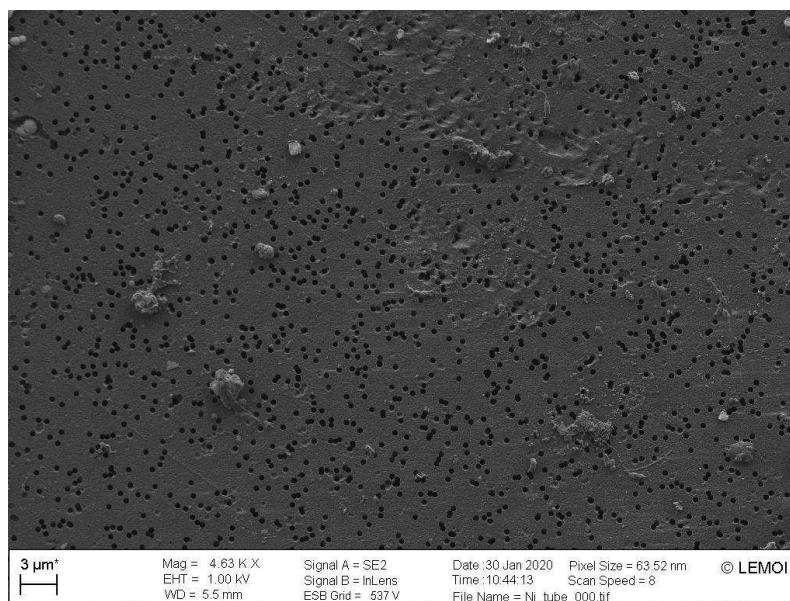


Рисунок 10 – Поверхность пористой поликарбонатной мембраны до осаждения

После осаждения и удаления поверхностной пленки можно наблюдать светлый ореол по границе поры, который представляет собой сечение металлического осадка  $\text{Co (P)}$  на стенке поры в форме трубки (рис. 11). На рис. 11 при-

веден результат осаждения в мембрану с порами 0,5 мкм. Для того, чтобы убедиться, что покрытие осаждается однородно по всей глубине поры, были выполнены срезы мембран после осаждения. На изображении, приведенном на рис. 12, *а, б, в*, можно видеть, как целую частицу в форме трубки (рис. 12, *а*), так и трубки, поврежденные при изготовлении среза (рис. 12, *б, в*). Изображения этих поврежденных трубок позволяют заключить, что толщина стенки трубы однородна вдоль всей ее длины и позволяют оценить внешние и внутренние диаметры микротрубок.

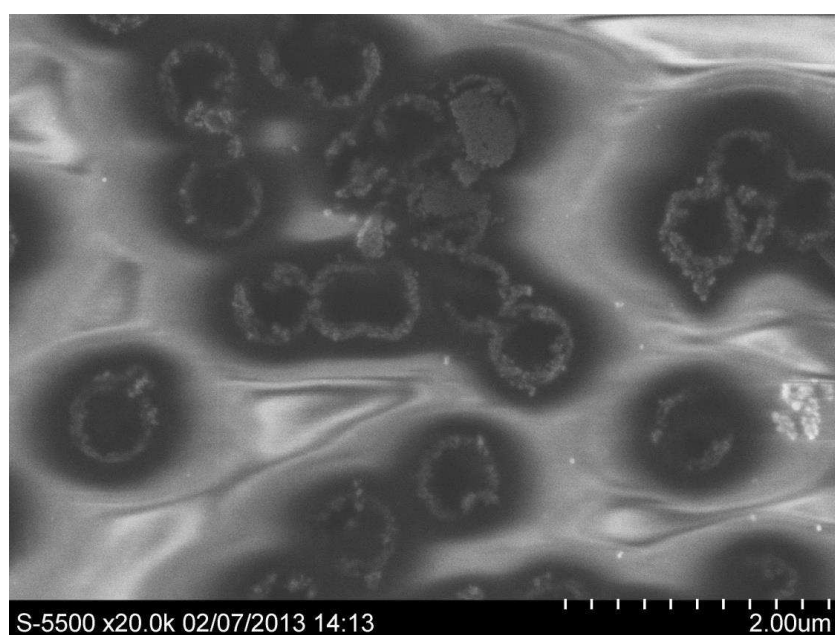
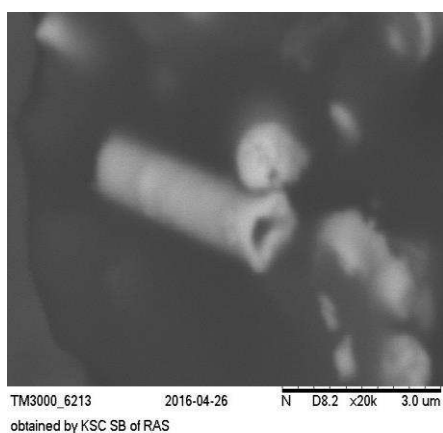
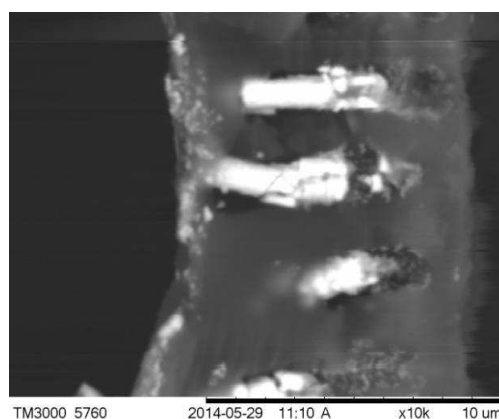


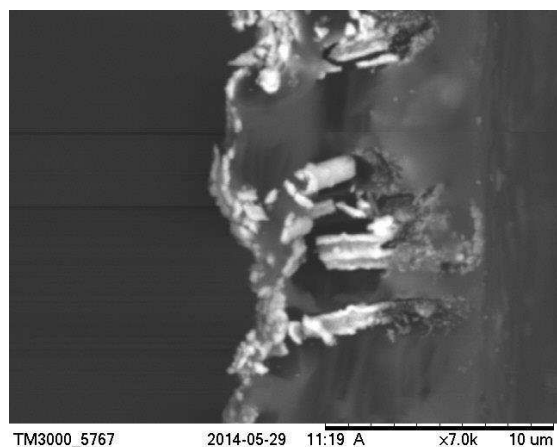
Рисунок 11 – Поверхность пористой поликарбонатной мембраны после осаждения



*а*



*б*



6

Рисунок 12 – Три различных варианта срезы поликарбонатной мембраны после осаждения:  
*a* – не поврежденная трубка; *б* – частично поврежденная трубка; *в* – полностью поврежденная трубка

Измерения параметров трубок по данным изображениям и их статистическая обработка, позволяют сделать следующие оценки: внутренний диаметр трубки  $0,57 \pm 0,14$  мкм, внешний диаметр  $1,08 \pm 0,11$  мкм. Образцы, использованные для изготовления срезов, получали осаждением в мембраны со средним диаметром пор 1 мкм. Согласие оценки внешнего диаметра трубки с этим размером (1 мкм) в пределах погрешности свидетельствует о достоверности выполненных измерений.

### 3.2 Кривые намагничивания и магнитная анизотропия микротрубок

На рис. 13 показаны кривые намагничивания для трубок, осажденных в поликарбонатные мембраны с диаметром пор 0,5 мкм. Осадки получены из растворов различных составов. При этом стенки трубок в этих двух образцах состоят из пересыщенных твердых растворов  $\text{Co (P)}$  с различной концентрацией фосфора, приведенной на рис. 13. Можно заметить, что намагничивание осуществляется легче в направлении параллельном оси трубки.

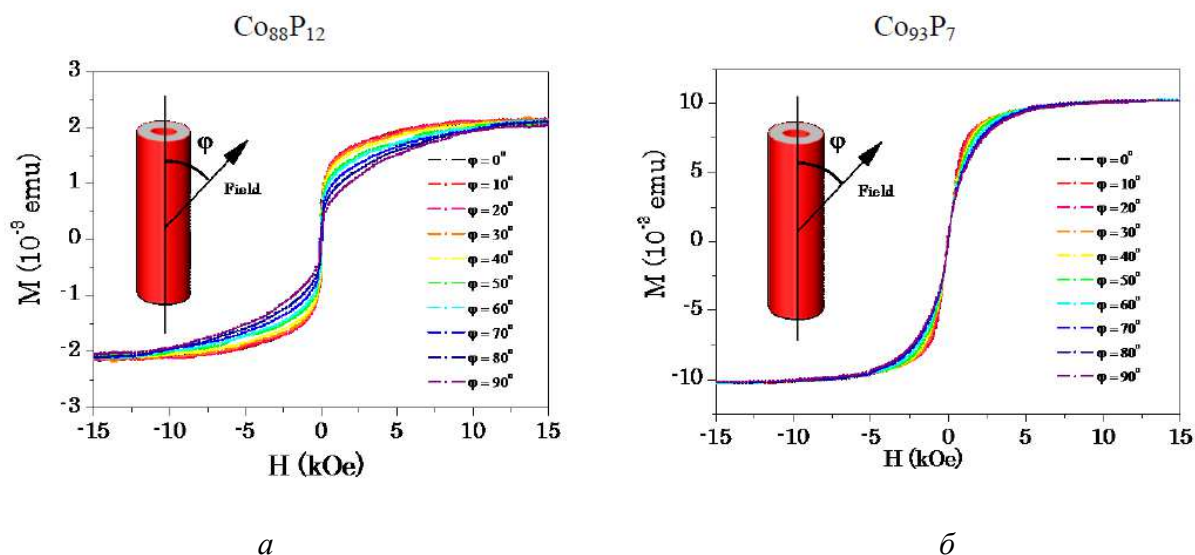


Рисунок 13 – Кривые намагничивания, снятые в различных геометриях приложения поля по отношению к оси трубок составов: *a* –  $\text{Co}_{88}\text{P}_{12}$ ; *б* –  $\text{Co}_{93}\text{P}_7$

Для того, чтобы лучше оценить качественно и количественно магнитную анизотропию, наблюдаемую на рис. 13, оценим поле магнитной анизотропии. Для этого мы применили новый способ визуализации данных по кривым намагничивания массива нанотрубок кобальта (рис. 14). Массив трубок упорядоченный, т. е. трубки в мембране ориентированы одинаково-перпендикулярно поверхности мембраны. На диаграмме вертикальное направление соответствует направлению длинной оси трубок. Поле растет от центра к краю. Намагниченность отображена цветом: красный – состояние с намагниченностью близкой к нулю, синий – полностью намагниченное состояние ( $M/M_s = 1$ ). Из рисунка хорошо видно, что образец демонстрирует анизотропию типа "ось легкого намагничивания" и эта ось совпадает с длинной осью трубок. Видны и более тонкие детали этой анизотропии. Такой способ представления кривых намагничивания является новым – он хорошо выявляет магнитную анизотропию нашего объекта и может найти применение при анализе магнитной анизотропии в других работах. Для нашего образца кроме симметрии магнитной анизотропии, из этого графика мы можем оценить поле магнитной анизотропии. Это самое большое поле, при котором образец магнитно насыщается.

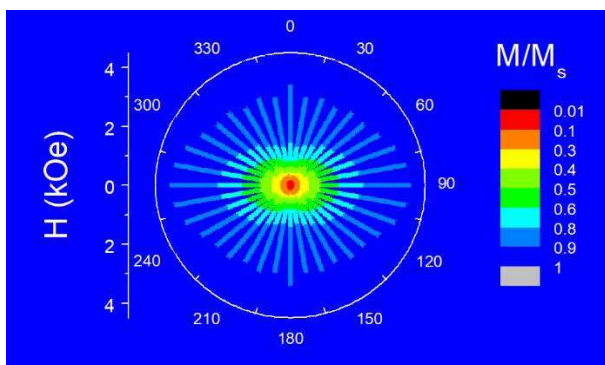


Рисунок 14 – Кривые намагничивания

Эта оценка дает поле магнитной анизотропии  $4,0 \pm 0,1$  кЭ.

### 3.3 Численный эксперимент, анализ свойств и перспектив применения магнитных микротрубок

Магнитные нанотрубки имеют диаметры сопоставимые по порядку величины с важным микромагнитным масштабом – магнитостатической обменной длиной  $L_x = (2A / \mu_0 M^2)^{1/2}$ , где  $A$  это константа обменного взаимодействия (характерный порядок величины  $10^{-11}$  Дж/м) и  $M$  – намагниченность. Типичные величины этого размера в ферромагнетиках от единиц до десятков нанометров. Этот размер дает нижнюю границу размеров выше которой могут формироваться магнитные домены. В магнитных микротрубках размеры достаточно велики, для того чтобы в них формировались если не многодоменные, то принципиально неоднородные состояния намагниченности.

Одно из таких состояний намагниченности, полученное методом компьютерного микромагнитного моделирования показано на рис. 15 для трубок кобальта с внешним диаметром 500 нм и внутренним 250 нм в нулевом внешнем поле. Несмотря на то, что магнитных доменов (областей с однородной намагниченностью) здесь выделить нельзя, магнитный поток полностью замкнут внутри данного объекта.

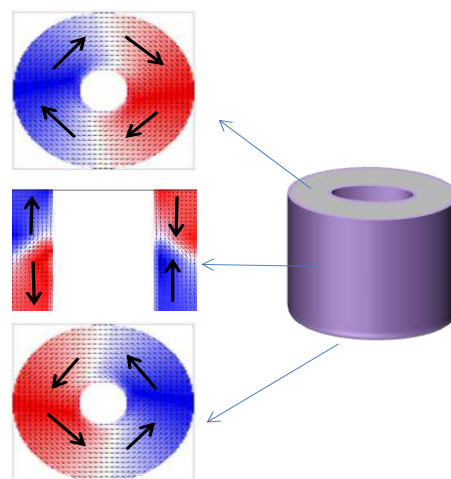


Рисунок 15 – Расчетное распределение намагниченности в микротрубке кобальта с внешним диаметром 500 нм и внутренним 250 нм

Это обстоятельство указывает на преимущества приготовления микрочастицы в форме трубки. Поскольку замыкание потока позволяет уменьшить движущие силы способствующие агрегации частиц в суспензии.

**Микромагнитное моделирование кривых намагничивания микротрубок.** Для анализа особенностей кривых намагничивания микротрубок мы выполнили микромагнитное моделирование петель магнитного гистерезиса в программном пакете с открытым кодом OOMMF [12]. Параметры микромагнитной проблемы выбирались соответствующими экспериментальным параметрам частиц либо покрытий Co-P [4]. Константы обменного взаимодействия и магнитной анизотропии согласно [8]:  $A = 1 \cdot 10^{-6} \text{ erg/cm}$ ,  $M_s = 1000 \text{ G}$ . Размер ячейки составлял  $10 \times 10 \times 10 \text{ нм}$ .

Модельные петли гистерезиса микротрубок имеют различную форму для частиц с различной толщиной стенки трубы (рис. 16). Петли рассчитаны для частиц с разными величинами параметра  $\beta = D_{in}/D_{out}$  - отношения диаметра полости к внешнему диаметру трубки, толщина оболочки связана с  $\beta$  как  $D_{out} \cdot (1 - \beta)/2$ . Кривая намагничивания, полученная в численном эксперименте (рис. 16) на одной трубке вблизи нулевого поля демонстрирует линейный отклик. Так для сплошного длинного цилиндра поле насыщения  $H_s$  должно быть равно

размагничивающему полю  $H_S = 2\pi M_S$ , при этом намагниченность линейно растет с ростом поля до  $H = H_S$ , т. е. магнитная восприимчивость в диапазоне  $(-H_S, H_S)$  равна  $\chi = M_S/H_S$ , что и наблюдается на рис. 16 при  $\beta = 0$ . Кривые намагничивания трубок демонстрируют более резкий, чем для цилиндра линейный рост намагниченности от поля, в области малых полей, с истончением стенки трубы. Диапазон реализации линейного участка в трубках ограничивается полями меньшими  $H_S$ , выше которых намагничивание идет нелинейно, а распределение намагниченности напоминает структуру луковицы, ось которой совпадает с направлением поля. Описание линейного участка в малых полях как  $M = H/H_S$  позволяет оценить величину  $H_S$  для частиц с различной толщиной оболочки (рис. 16). Из рис. 16, б видно, что это поле хорошо согласуется с оценкой  $H_S = 2\pi M_S v = 2\pi M_S(1 - \beta^2)$ , где  $v$  - объемная доля магнитной стенки [22,23].

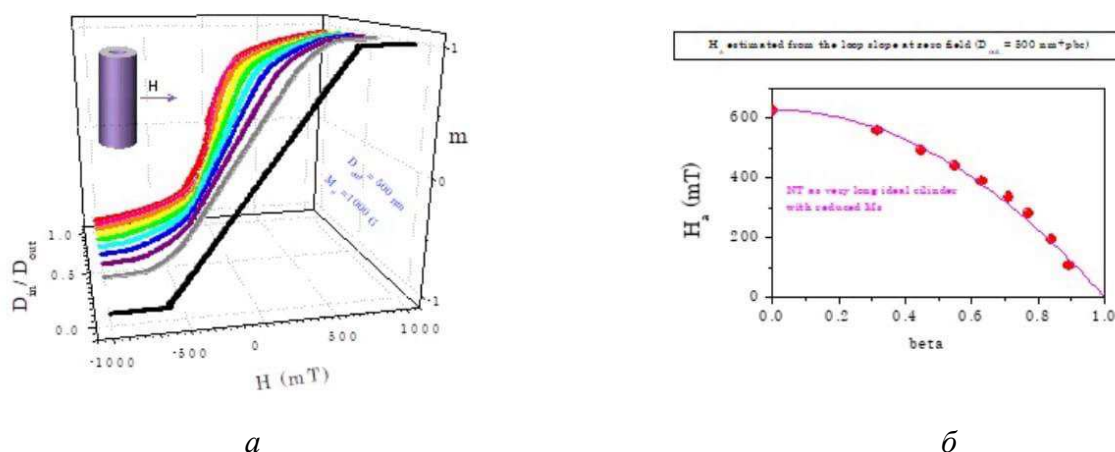


Рисунок 16 – Некоторые значения трубок СО (Р):

- a* – петли гистерезиса, рассчитанные с помощью микромагнитного моделирования;
- б* – поведение поля, полученного экстраполяцией линейного участка кривой к насыщению

Как показывает рис. 16, величина  $H_a$ , оцененная из наклона линейного участка кривой намагничивания чувствительна к толщине магнитной оболочки. Таким образом, из магнитных измерений можно оценить толщину стенки трубы. Из экспериментального кривого намагничивания мы оценили поле магнитной

анизотропии для трубок Co (P) на уровне 4 кОе (400 мТ). Используя эту величину по рис. 16, б можно оценить  $\beta \approx 0,6$ .



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено получение частиц в форме ферромагнитных микро- трубок в пористой поликарбонатной матрице и исследованы магнитные характеристики этого материала.

На основании проведенных исследований установлено следующее. Ферро- магнитный микро– либо нано–элемент вытянутой формы (игла, палочка) испытывает максимальный вращающий механический момент среди элементов различной формы в одном и том же однородном магнитном поле. Однако, вместе с этим, магнитная палочка является эффективным источником магнитного поля. При создании коллоидных растворов на основе таких элементов это приводит к негативным последствиям, а именно: приводит к слипанию частиц за счет магнитного диполь-дипольного взаимодействия. Использование магнитных частиц в форме трубки приводит к незначительному снижению вращательного магнитного момента. Однако, при этом, форма трубки способствует замыканию магнитного потока внутри элемента в малых полях и, следовательно, к устранению диполь-дипольного взаимодействия между частицами. Таким образом, использование магнитных частиц в форме трубок дает уникальное сочетание прикладных характеристик для применений в биомедицине: высокая намагниченность и высокая анизотропия формы, сочетаются с возможностью резкого ослабления магнитного диполь–дипольного взаимодействия между элементами в небольших полях. Последнее означает улучшенную устойчивость гидрозолей к слипанию частиц.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Головин Ю.И. Новый подход к управлению биохимическими реакциями в магнитной наносуспензии с помощью низкочастотного магнитного поля // Головин Ю.И., Клячко Н.Л., Головин Д.Ю., Ефремова М.В., Самодуров А.А., Сокольски–Папков М., Кабанов А.В. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 5. С. 24–32.

2 Головин Ю.И. Однодоменные магнитные наночастицы как генераторы силы для наномеханического управления биохимическими реакциями низкочастотным магнитным полем // Головин Ю.И., Клячко Н.Л., Сокольски–Папков М., Кабанов А.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 11. С. 1621 – 1630.

3 Головин Ю.И. Наномеханическое управление активностью ферментов, иммобилизованных на однодоменных магнитных наночастицах // Головин Ю.И., Грибановский С.Л., Клячко Н.Л., Кабанов А.В. // Журн. технической физики. 2014. Т. 84. № 6. С. 147–150.

4 Головин Ю.И. Однодоменные магнитные наночастицы в переменном магнитном поле как медиаторы локальной деформации окружающих макромолекул // Головин Ю.И., Грибановский С.Л., Клячко Н.Л., Кабанов А.В. // Физика твердого тела. 2014. Т. 56. № 7. С. 1292–1300.

5 Головин Ю.И. Магнитомеханическое управление высвобождением лекарств из функционализированных магнитных наночастиц // Головин Ю.И., Клячко Н.Л., Грибановский С.Л., Головин Д.Ю., Мажуга А.Г. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 14. С. 22–26.

6 Golovin Y.I. The dynamics of magnetic nanoparticles exposed to non-heating alternating magnetic field in biochemical applications: theoretical study // Golovin Y.I., Gribanovsky S.L., Golovin D.Y., Zhigachev A.O., Klyachko N.L., Majouga A.G., Sokolsky M., Kabanov A.V. // J. Nanopart. Res. 2017. V. 19. P. 59.

7 Головин Ю.И. Модель контролируемого высвобождения лекарств из функционализированных магнитных наночастиц негреющим переменным магнитным полем // Головин Ю.И., Клячко Н.Л., Грибановский С.Л., Головин Д.Ю., Мажуга А.Г. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 5. С. 89-95.

8 Golovin Y. Modeling drug release from functionalized magnetic nanoparticles actuated by non-heating low frequency magnetic field // Golovin Y., Golovin D., Klyachko N., Majouga A., Kabanov A. // J. Nanopart. Res. 2017. V. 19. P. 64 (10 p.).

9 Nanomedicine, Volume 1: Basic capabilities, by Robert A. Freitas Jr., (Landes Bioscience, Austin, 1999)].

10 L.D. Landau and E.M. Lifshitz, Theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies // Phys. Z. Sowietunion. – 1935. – V. 8. – P. 153–169. ; Gilbert, T.L. Lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetization field // Phys. Rev. – 1955. – V. 100. – P. 1243–1243.

11 А.А. Самарский и Е.С. Николаев, Методы решения сеточных уравнений. – Москва: Из-во Наука, 1978–592 с.

12 M.J. Donahue and D.G. Porter, OOMMF User's Guide, Version 1.0. – Gaithersburg: Tech. Rep. National Institute of Standards and Technology, 1999. – 83 p.

13 Fontana R. E. Magnetic memories: Memory hierarchy and processing perspectives // Fontana R. E., Hetzler S. R. // Journal of Applied Physics. – 2006. – Vol. 99. – 08N902.

14 Rozhkova E. A. Ferromagnetic microdisks as carriers for biomedical applications // Rozhkova E. A., Novosad V., Kim D. H. // Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol. 105. – P. 07B306.

15 Scholz W. Micromagnetic simulation of the pinning and depinning process in permanent magnets // Scholz W., Guslienko K. Yu., Novosad V., Suess D., Schrefl T. // JMMM. – 2003. – Vol. 266. – P. 155–163.

16 Wachowiak A. Direct Observation of Internal Spin Structure of Magnetic Vortex Cores // Wachowiak A., Wiebe J., Bode M., Pietzsch O., Morgenstern M., Wiesendanger R. // Science. – 2002. – Vol. 298. – P. 577.

17 Raabe J. Magnetization pattern of ferromagnetic nanodisks // Raabe J., Pulwey R., Sattler R., Schweinbock T., Zweck J., Weiss D. // Journal of Applied Physics. 2000. –Vol. 88. – P. 4437.

18 Guslienko K. Y. Dynamic origin of vortex core switching in soft magnetic nanodots // Guslienko K. Y., Lee K. –S., Kim S.–K. // Physical Review Letters. – 2008. – Vol. 100. – 027203.

19 Youn-Seok Choi. Out-of-plane current controlled switching of the fourfold degenerate state of a magnetic vortex in soft magnetic nanodots // Youn-Seok Choi, Myoung – Woo Yoo, Ki-Suk Lee, Young–Sang Yu, Hyunsung Jung, and Sang-Koog Kim. // Applied Physics Letters. – 2010. – Vol. 96. – 072507.

20 Shinjo T. Magnetic vortex core observation in circular dots of permalloy // Shinjo T., Okuno T., Hassdorf R., Shigeto K., and Ono T // Science. –2000. – Vol. 289. – P. 930.

21 Guslienko K. Y. Magnetic vortex state stability reversal and dynamics in restricted geometries //Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2008. – Vol. 8. – P. 2745.

22 Guslienko K. Y. Field evolution of magnetic vortex state in ferromagnetic disks // Guslienko K. Y., Novosad V., Otani Y., Shima H., and Fukamichi K. // Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 78, – No. 24, – P. 3848.

23 Guslienko K. Magnetization reversal due to vortex nucleation, displacement, and annihilation in submicron ferromagnetic dot arrays// Guslienko K. Y., Novosad V., Otani Y., Shima H., and Fukamichi K. // Physical Review B. – 2001. – Vol. 65. – 024414.

24 Pigeau B. A frequency-controlled magnetic vortex memory // Pigeau B., De Loubens G., Klein O., Riegler A., Lochner F., Schmidt G., Molenkamp L. W., Tiberkevich V. S., and Slavin A. N. // Applied Physics Letters. – 2010. – Vol. 96. – No. 13.

25 Guslienko K. Y. and Novosad V. Vortex state stability in soft magnetic cylindrical nanodots // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 96. – P. 4451.

26 Van Waeyenberge B. Magnetic vortex core reversal by excitation with short bursts of an alternating field // Van Waeyenberge B., Puzic A., Stoll H., Chou K. W., Tyliczszak T., Hertel R., Faehle M., Brueckl H., Rott K., Reiss G., Neudecker I., Weiss D., Back C. H., and Schuetz G. // *Nature*. – 2006. – Vol. 444. – P. 461.

27 Ivanov B. A. Non-newtonian dynamics of the fast motion of a magnetic vortex // Ivanov B. A., Avanesyan G. G., Khvalkovskiy A. V., Kulagin N. E., Zaspel C. E., Zvezdin K. A. // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, – 2010 – Vol. 91. No. 4. – P. 178.

28 Kim P. D. On the Low-frequency resonance of magnetic vortices in micro- and nanodots // Kim P. D., Orlov V. A., Prokopenko V. S., Zamai S. S., Prints V. Ya., Rudenko R. Yu., Rudenko T. V. // *Physics of the Solid State*. – 2015. – Vol. 57. – P. 30.

29 Ki-Suk Lee and Sang-Koog Kim, Two circular-rotational eigenmodes and their giant resonance asymmetry in vortex gyrotropic motions in soft magnetic nanodots // *Physical Review B*. – 2008. – Vol. 78. – 014405.

30 Denysenkov V. P. Grishin A. M. Reliable low-power control of ultrafast vortex-core switching with the selectivity in an array of vortex states by in-plane circular-rotational magnetic fields and spin-polarized currents // *Applied Physics Letters*. – 2003. – Vol. 74. – P. 3400.

31 Bader S. D. Opportunities in nanomagnetism // *Reviews of Modern Physics*. – 2006. – Vol. 78. – P. 87.

32 Pribiag V. S. Magnetic vortex oscillator driven by d.c. spin-polarized current // Pribiag V. S., Krivorotov I. N., Fuchs G. D., Braganca P. M., Ozatay O., Sankey J. C., Ralph D. C., Buhrman R. A. // *Nature Physics*. – 2007. – Vol. 3. – P. 498.

33 Park J. P., Crowell P. A. Interactions of spin waves with a magnetic vortex // *Physical Review Letters*. – 2005. – Vol. 95. – 167201.

34 Kim S. –K. Reliable low-power control of ultrafast vortex-core switching with the selectivity in an array of vortex states by in-plane circular-rotational magnetic fields and spin-polarized currents // Kim S. –K., Lee K. –S., Yu Y. –S., Choi Y. –S. // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92. – 022509.

35 Zhu X. Broadband spin dynamics of the magnetic vortex state: Effect of the pulsed field direction, // Zhu X., Metlushko V., Grutter P. Freeman M. R. // *Physical Review*.

36 G. Precise probing spin wave mode frequencies in the vortex state of circular magnetic dots // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 96. – P. 012503.

37 Б.А. Иванов, Д.Д. Шека. Вихри в конусной фазе классического квазидвумерного ферромагнетика // *ФНТ* – 1995. – Vol. 21. – 11. – P. 1148.

38 Воронов В.П. Двухмерные топологические солитоны в магнетиках // Воронов В.П., Иванов Б.А., Косевич А.М. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики* – 1983. – Vol. 84. – P. 148.

39 Choe S. –B. Vortex core-driven magnetization dynamics // Choe S. –B., Acremann Y., Scholl A., Bauer A., Doran A., Stohr J., Padmore H. A. // *Science* – 2004. – Vol. 304. – P.

40 Bader S. D., Opportunities in nanomagnetism // *Reviews of Modern Physics*. – 2006. – Vol. 78. – P. 87.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
Кафедра Материаловедения и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В.И. Темных

(подпись)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

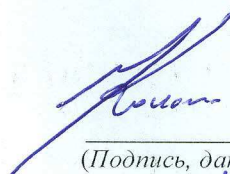
**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**Направление:** 22.03.01 Материаловедение и технология материалов

**Профиль:** 22.03.01.07 материаловедение и технологии материалов в  
машиностроении

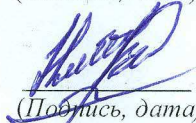
**Исследование свойств микротрубок кобальта в поликарбонатной  
мембране как композиционного материала**

Научный руководитель

  
(Подпись, дата)

С.В. Комогорцев

Выпускник

  
(Подпись, дата)

А.Х. Нумонов

Нормоконтроль

  
(Подпись, дата)

Л.А. Свечникова

Красноярск 2020