

На правах рукописи



**ФАМ ТХАНЬ МИНЬ**

**РАЗРАБОТКА СОРБЕНТОВ ИЗ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ ДЛЯ  
ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

02.00.11 – Коллоидная химия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Белгород – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

**Научный руководитель:** **Лебедева Ольга Евгеньевна**  
доктор химических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Михаленко Ирина Ивановна**  
доктор химических наук, профессор,  
профессор кафедры физической и  
коллоидной химии ФГАОУ ВО  
«Российский университет дружбы  
народов».

**Гаврилова Наталья Николаевна**  
кандидат химических наук, доцент,  
доцент кафедры коллоидной химии  
ФГБОУ ВО «Российский химико-  
технологический университет  
им. Д.И. Менделеева».

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Ивановский государственный  
химико- технологический университет».

Защита состоится «21» июня 2019 года в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.014.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте [http://gos\\_att.bstu.ru/dis/fam](http://gos_att.bstu.ru/dis/fam).

Автореферат разослан «06» мая 2019.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Е.А. Дороганов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящее время проблемы рационального использования природных ресурсов становятся все более актуальными. В последнее десятилетие появилась и развивается идея использования так называемых «сорбентов нулевой стоимости», которые сами являются отходами каких-либо процессов. Применение для очистки воды сорбентов, полученных из отходов, позволяет снизить затраты и превращает отходы в ценное сырье для получения полезных материалов.

Особенно привлекательным является изготовление сорбентов из возобновляемого растительного сырья. Исследований, посвященных разработке новых сорбентов из шелухи и стеблей подсолнечника, кукурузных початков, рисовой шелухи и других отходов сельского хозяйства, выполнено достаточно много. Перспективным сырьем для приготовления сорбентов считают отходы молотого кофе (кофейную гущу). Этот напиток широко распространен во всем мире, и вопросы утилизации кофейной гущи представляют практический интерес. В странах Юго-Восточной Азии, например, во Вьетнаме ресурсный потенциал этого сырья весьма велик.

**Степень разработанности темы.** Отделение от очищаемого раствора и регенерация растительных сорбентов до сих пор представляет проблему, которая сдерживает широкое применение этих сорбционных материалов. Магнитная сепарация является перспективным методом для отделения порошкообразных адсорбентов от раствора с помощью внешнего магнитного поля. Следовательно, придание материалам из растительного сырья новой функции способно многократно увеличить их потенциал. В основу настоящей работы положена гипотеза о том, что отходы кофе могут служить сырьем для получения гибридных органо-неорганических материалов, сорбционная способность которых обеспечивается растительным компонентом, а дополнительные магнитные свойства создаются путем диспергирования в растительной матрице наночастиц оксида железа. Имеется несколько публикаций в зарубежных журналах, посвященных разработке магнитных композиционных сорбентов из отходов молотого кофе. Во всех публикациях отходы кофе применялись без дополнительной обработки. Известно, однако, что обработка щелочью существенно повышает сорбционную способность отходов кофе.

**Цель и задачи работы.** Разработка новых магнитных гибридных органо-неорганических композиционных материалов на основе растительных отходов для применения в технологиях сорбционной очистки сточных вод от загрязнителей различной природы.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Разработать способ получения магнитных композиционных сорбентов, представляющих собой дисперсные системы – частицы оксида железа, распределенные в органической матрице.

2. Определить коллоидно-химические свойства полученных композитов и их составных частей.
3. Определить эффективность очистки модельных водных растворов, содержащих ионы тяжелых металлов, органические красители, органические вещества ароматического ряда.
4. Оценить возможность регенерации использованных магнитных композиционных сорбентов.
5. Провести испытания опытно-промышленной партии магнитного композиционного сорбента в очистке промышленных сточных вод.

#### **Научная новизна работы.**

Разработан способ получения гибридного органо-неорганического композитного материала, в структуре которого частицы оксида железа диспергированы в аморфной пористой органической матрице. Компонентами материала служат отходы молотого кофе и оксид железа. Определены оптимальные параметры синтеза указанного материала (состав, температура и время синтеза, скорость перемешивания), сочетающего высокую сорбционную способность и магнитные свойства. Предложен механизм формирования композита, заключающийся в электростатическом и ковалентном взаимодействии компонентов.

Установлены закономерности сорбции красителей и ионов  $Pb^{2+}$  магнитными композитами, заключающиеся во взаимодействии сорбатов с функциональными группами поверхности, выявлены интервалы pH, в которых знак электрокинетического потенциала способствует сорбции катионов либо анионов. Доказано, что полученный гибридный органо-неорганический материал является многофункциональным сорбентом.

Изучены кинетические и термодинамические параметры адсорбции органических красителей, органических веществ ароматического ряда и ионов  $Pb^{2+}$  магнитными композиционными сорбентами. Показано, что сорбция во всех случаях протекает в смешаннодиффузионном режиме по кинетике псевдвторого порядка.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Предложен оригинальный состав гибридного органо-неорганического материала, способного осуществлять сорбцию положительных, отрицательных и нейтральных сорбатов путем регулирования дзета-потенциала поверхности за счет варьирования pH раствора. Детально охарактеризованы свойства нового гибридного материала. Возобновляемым источником сырья для получения магнитного композиционного сорбента служат растительные отходы, что позволяет отнести материал в категорию сорбентов низкой стоимости. Сорбент легко отделяется от раствора путем магнитной сепарации, пригоден для поглощения органических и неорганических загрязнителей и способен к регенерации. Возможность практического применения сорбента для очистки промышленных стоков подтверждена опытно-промышленными испытаниями.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы современные физико-химические методы исследований: рентгенофазовый

анализ, энергодисперсионный анализ, сканирующая электронная микроскопия, определение дзета-потенциала методом электрофореза, инфракрасная спектроскопия, вибромагнетометрия, лазерный анализ размера частиц, спектрофотометрический метод, седиментационный анализ и методы статистической обработки информации.

**Положения, выносимые на защиту:**

Способ получения нового гибридного органо-неорганического композитного материала, обладающего магнитными свойствами;

Оптимальные параметры синтеза, позволяющие получить эффективный сорбент, пригодный для отделения от раствора путем магнитной сепарации;

Экспериментальные данные о составе, структуре, морфологии и механизме формирования магнитного композитного материала;

Экспериментальные данные об эффективности очистки модельных водных растворов магнитным композиционным сорбентом от органических красителей, дубильной кислоты и ионов  $Pb^{2+}$ . Кинетические и термодинамические характеристики процессов сорбции указанных веществ магнитным композиционным сорбентом;

Экспериментальные данные о способности сорбента к регенерации. Результаты опытно-промышленных испытаний предлагаемого сорбента в очистке промышленных стоков.

**Достоверность полученных результатов** основывается на использовании современного научного оборудования, грамотной интерпретации данных. Полученные результаты не противоречат современным научным представлениям и основным теориям, а также опубликованным данным ведущих исследователей.

**Внедрение результатов исследований.** Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс в виде лабораторной работы «Способ получения композиционного сорбента с магнитными свойствами» по дисциплине «Коллоидная химия» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 04.03.01 Химия.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы были представлены и обсуждены на Международной научно-технической конференции «Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды» (Белгород, 2015); на Всероссийской научно-практической конференции «Физическая и коллоидная химия – основа новых технологий и современных методов анализа в химической и пищевой отраслях промышленности» (Воронеж, 2016); I Молодёжной научно-практической конференции с международным участием «Естественнонаучные, инженерные и экономические исследования в технике, промышленности, медицине и сельском хозяйстве» (Белгород, 2017); The 7<sup>th</sup> International IUPAC Conference on Green Chemistry (Moscow, 2017); Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии-2018» (Курск, 2018). Испытания опытно-промышленной партии магнитного композиционного

сорбента на основе отходов кофе были проведены в Институте химии и окружающей среды Вьетнамской академии наук и технологий (MICER, Вьетнам) и Центре общественных услуг (Промышленный район Хоа Хиеп, Вьетнам).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 13 научных работах, в том числе – в 4 статьях в изданиях из перечня ВАК РФ, 2 – в журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, 6 публикациях в сборниках трудов всероссийских и международных конференций. Получен 1 патент РФ.

**Личный вклад автора** заключается в изучении и анализе литературных источников, разработке и подборе оптимальных условий проведения эксперимента, проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировке выводов. Общее планирование работы, обработка и обсуждение результатов выполнены под руководством д.х.н., профессора Лебедевой О.Е.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 178 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, включающего 22 таблицы, 35 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору литературы. Рассмотрены структура, химический состав, свойства отходов кофе, оксида железа и магнитных композиционных сорбентов. Описаны методы получения и применение магнитных композиционных сорбентов для очистки сточных вод.

Вторая глава содержит описание объектов, реагентов и основных экспериментальных методов исследования.

В третьей главе представлены результаты получения и исследования магнитных композиционных сорбентов на основе отходов кофе, модифицированных щелочью, и частиц оксида железа.

**Получение магнитных гибридных органо-неорганических композиционных материалов на основе отходов кофе, модифицированных щелочью, и частиц оксида железа**

Для получения магнитного композиционного сорбента (ОКНМ) использовали магнетит, порошок которого получали в щелочной среде из смеси соли трехвалентного железа и сульфата натрия. Полученный  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  диспергировали в 1-5% растворе поливинилового спирта (ПВС). Раствор нагревали при температуре 343-363 К и добавляли кофейную гущу (ОКИ), предварительно обработанную 0,5 М раствором гидроксида натрия (ОКН), в массовом соотношении ОКН: $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – от 2:1 до 6:1. Далее раствор перемешивали со скоростью 300-900 оборотов в минуту в течение 30-90 минут. Образовавшуюся взвесь отфильтровывали, затем композит сушили при температуре 378 К до постоянной массы. После этого композит измельчали и просеивали через сито с отверстиями размером 0,315 мм.

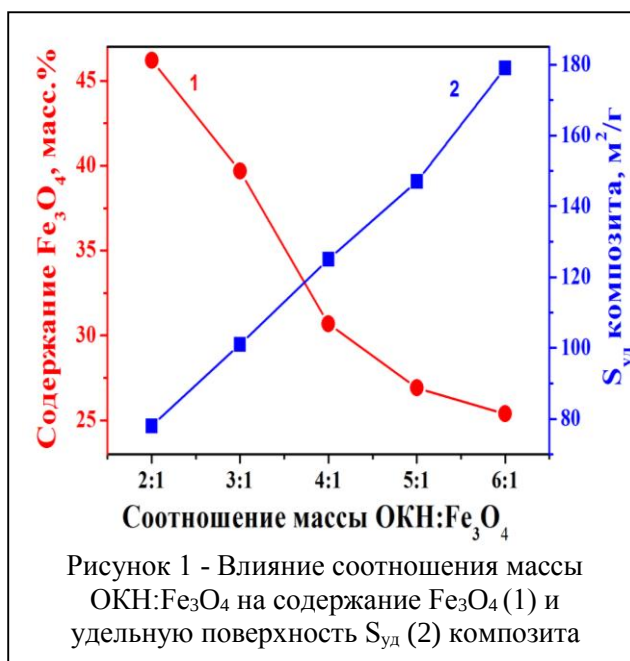
Предполагалось, что сорбционную способность композита обеспечивает его органическая часть, оксид железа создает магнитные свойства. Хотя содержание ПВС невелико, но он выполняет важную роль в создании дисперсионной среды золя для образования слоя покрытия на поверхности частиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , их защиты от окисления, а также служит сшивающим агентом между частицами оксида железа и отходами кофе.

### Определение оптимальных параметров синтеза композиционных сорбентов

Для исследования влияния отношения  $\text{ОКН}:\text{Fe}_3\text{O}_4$  на свойства продукта готовили образцы с массовым соотношением  $\text{ОКН}:\text{Fe}_3\text{O}_4$  от 2:1 до 6:1 при фиксированных остальных параметрах. Содержание  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в составе сорбента определяли методом энергодисперсионного анализа.

Результаты приведены на рис.

1. Очевидно, что при повышении соотношения  $\text{ОКН}:\text{Fe}_3\text{O}_4$  содержание  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  уменьшается. Снижение содержания  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в композите вызывает уменьшение способности сорбента к магнитной сепарации. Наоборот, удельная поверхность увеличивается. Это значит повышение способности адсорбции сорбента. При соотношении 4:1 порошок сорбента, содержащего 30 масс.% магнетита ( $\text{ОКНМ30}$ ), хорошо притягивается магнитом, до 95% сорбента удается отделить от раствора таким способом, а удельная поверхность составляет  $125 \text{ м}^2/\text{г}$ . Соотношение  $\text{ОКН}:\text{Fe}_3\text{O}_4$ , равное 4:1, было выбрано для дальнейших исследований. Далее условия синтеза композитов оптимизировали по критерию «содержание  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в составе сорбента».



Для определения значимых параметров использовали метод планирования эксперимента с помощью программы Statgraphics Centurion XV. Рассматривали влияние на содержание  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $Y$ , масс. %) 5 параметров получения магнитных композитов: соотношения массы  $\text{ОКН}:\text{Fe}_3\text{O}_4$ , содержания поливинилового спирта (ПВС), времени синтеза, скорости перемешивания и температуры синтеза (таблица 1).

Для определения степени влияния исследуемых параметров на выбранный критерий был проведен регрессионный анализ результатов. На основании анализа карты Парето и результатов дисперсионного анализа было получено уравнение регрессии, которое после исключения незначимых коэффициентов имеет вид:

$$Y = 29,79 - 4,30x_1 + 0,15x_3 + 0,01x_4$$

Таблица 1 - Матрица планирования эксперимента

| Параметры                                            | Размерность  | Обозначение    | Нижний уровень | Верхний уровень |
|------------------------------------------------------|--------------|----------------|----------------|-----------------|
| Соотношение массы ОКН:Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | безразмерный | x <sub>1</sub> | 2:1            | 6:1             |
| Содержание ПВС                                       | %            | x <sub>2</sub> | 1              | 5               |
| Время синтеза                                        | мин.         | x <sub>3</sub> | 30             | 90              |
| Скорость перемешивания                               | об./мин.     | x <sub>4</sub> | 300            | 900             |
| Температуры синтеза                                  | К            | x <sub>5</sub> | 343            | 363             |

В конечном итоге были установлены следующие оптимальные параметры синтеза магнитных композитов: ОКН:Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> - 4:1, время синтеза - 60 минут, скорость перемешивания - 600 об./мин., содержание ПВС - 2% и температура синтеза 353 К.

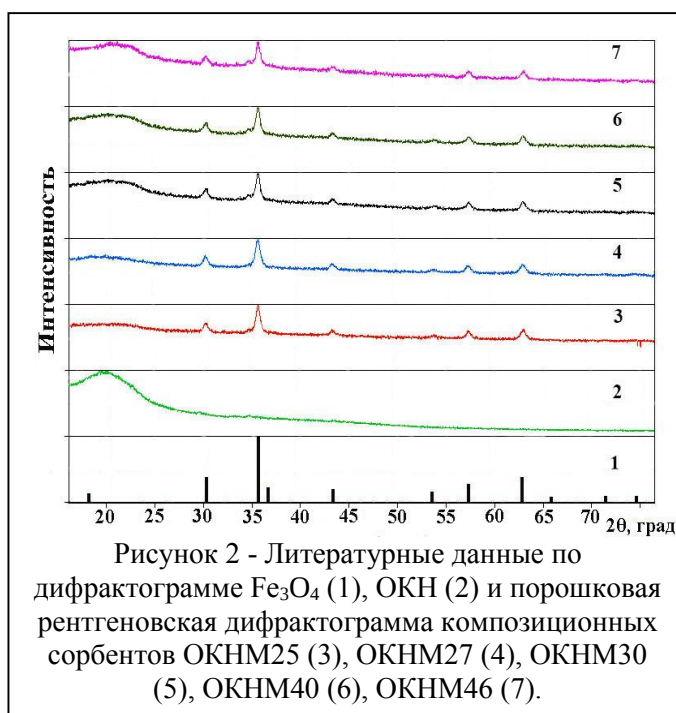
### Общая характеристика гибридных органо-неорганических материалов

Полученные гибридные материалы и их основные составные части (отходы кофе, обработанные щелочью - ОКН, и синтетический магнетит) были подробно охарактеризованы с помощью набора физико-химических методов.

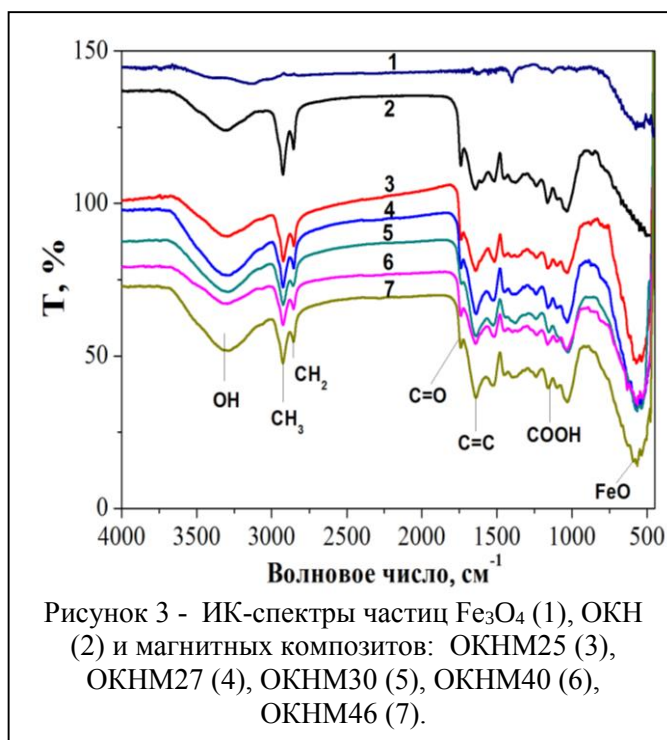
Энергодисперсионный анализ показал, что частицы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> содержат только железо (67,56 масс. %) и кислород (25,38 масс. %); в образце ОКН преобладают углерод (74,59 масс. %) и кислород (20,85 масс. %), для магнитных композитов (ОКНМ различного состава) фиксируются углерод (46,91 – 61,99 масс. %), кислород (14,91 – 16,32 масс. %) и железо (18,37 – 33,44 масс. %). Присутствие незначительных количеств кальция и магния обусловлено, вероятно, использованием водопроводной воды для заваривания кофе. Кроме того, микроколичества калия, серы, натрия, фосфора, меди, кремния обнаруживаются во всех образцах отходов кофе и магнитных композитов.

Рентгенофазовый анализ для частицы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ОКН и магнитных композитов (рис. 2) показал, что кристаллическая структура Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> сохраняется в магнитных композиционных сорбентах. Дифрактограммы композитов содержат все характерные рефлексы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и не содержат пиков других веществ.

Для оценки функциональных групп поверхности магнитных композитов, способных участвовать в адсорбции, были получены ИК-Фурье спектры сорбентов (рис. 3). Анализ ИК спектров показал, что на



поверхности отходов кофе ОКН и композитов существуют значительное количество карбонильных и карбоксильных групп (диапазон 1300-1750  $\text{см}^{-1}$ ), а также гидроксильные группы (широкие полосы при 3292  $\text{см}^{-1}$ ). Эти группы могут быть потенциальными сорбционными центрами. Ряд полос (диапазон 538-573  $\text{см}^{-1}$ ) отсутствует в спектре отходов кофе ОКН (2), однако появляется при введении частиц оксида железа в композиты и соответствует колебаниям Fe-O. Таким образом, это дополнительно подтверждает сосуществование частиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и ОКН в магнитных композиционных сорбентах.



Исследования методом СЭМ свидетельствуют, что частицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  образуют агломераты размера 0,3-5 мкм (рис. 4а), морфология ОКН демонстрирует пористую структуру, что позволяет ожидать высокой сорбционной емкости отходов кофе (рис. 4б). Полученный композит представляет собой набор неоднородных по форме и размеру агломератов аморфных микрочастиц с размером 2-50 мкм (рис. 4в). При этом значительная часть транспортных пор не блокируется, что обеспечивает хорошие сорбционные характеристики модифицированных отходов кофе.

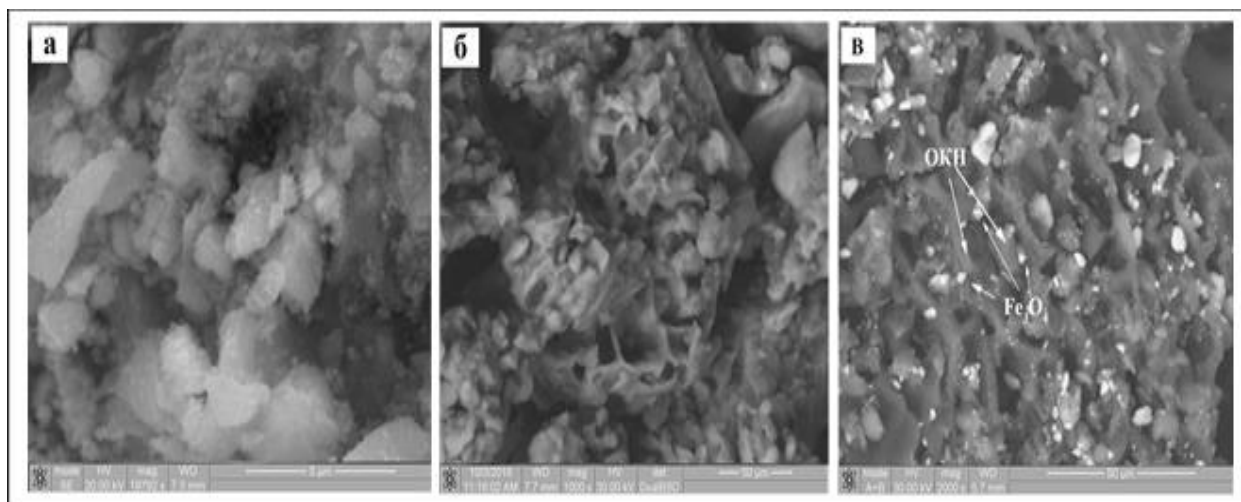


Рисунок 4 - СЭМ снимки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (а); ОКН (б) и ОКНМ30 (в)

Измерение намагниченности насыщения магнитных композитов показали, что с повышением содержания  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в композите намагниченность сорбента возрастает (рис. 5).

Совокупность полученных данных позволяет заключить, что гибридные магнитные композиционные сорбенты образуются путем формирования электростатических и ковалентных связей между функциональными группами поверхности отходов кофе, молекулами поливинилового спирта и функциональными группами поверхности частиц оксида железа.

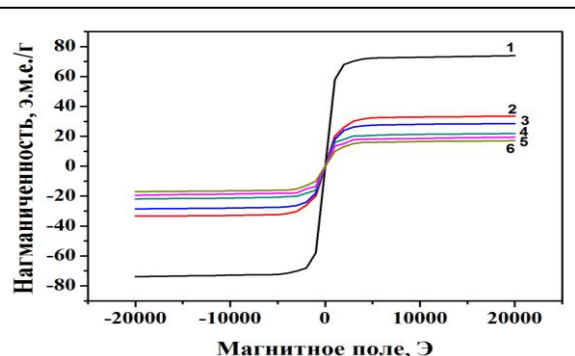


Рисунок 5 - Кривые намагничивания частиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (1) и магнитных композитов: ОКНМ46 (2), ОКНМ40 (3), ОКНМ30 (4), ОКНМ27 (5), ОКНМ25 (6).

### Коллоидно - химические свойства магнитных композитов

Коллоидно-химические свойства сорбента в значительной мере определяют протекание процесса адсорбции. В таблице 2 представлены характеристики исходных отходов кофе, отходов, обработанных щелочью, и композиционных сорбентов с различным содержанием оксида железа.

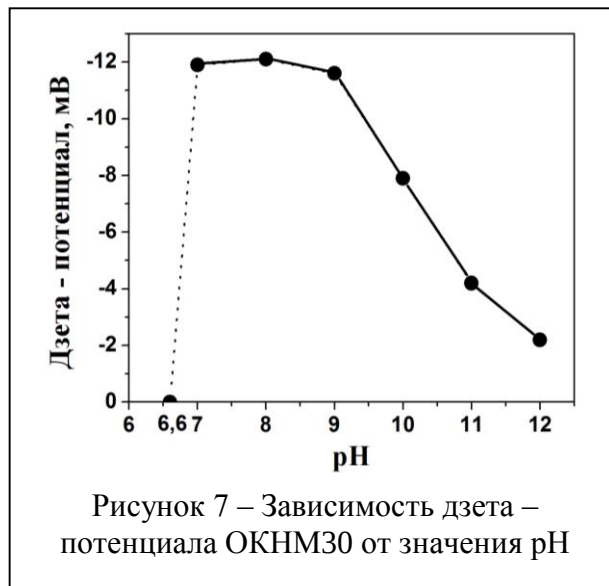
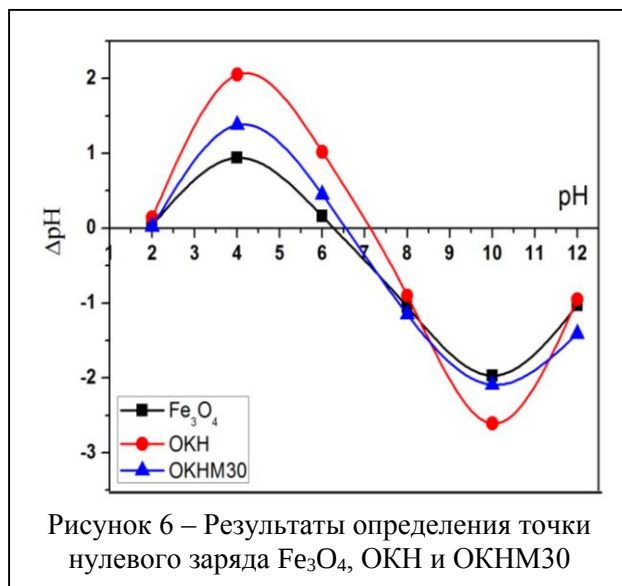
Таблица 2 - Коллоидно - химические свойства сорбентов

| Наименование                            | Значение |       |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                         | ОКИ      | ОКН   | ОКНМ46 | ОКНМ40 | ОКНМ30 | ОКНМ27 | ОКНМ25 |
| Влажность, масс. %                      | 2,4      | 2,3   | 2,4    | 2,3    | 2,4    | 2,6    | 2,4    |
| Насыпная плотность, г/дм <sup>3</sup>   | 95,23    | 90,07 | 159,57 | 146,48 | 134,34 | 117,27 | 105,21 |
| Дзета-потенциал при pH 7, мВ            | -9,6     | -20,5 | -10,5  | -11,0  | -11,9  | -12,7  | -14,9  |
| Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г | 38       | 210   | 78     | 101    | 125    | 147    | 179    |
| Адсорбционная активность по йоду, %     | 6,3      | 31,1  | 14,4   | 17,6   | 20,7   | 23,1   | 25,2   |

Необходимо отметить, что обработка отходов кофе щелочью привела к существенному росту площади поверхности по сравнению с исходным образцом отходов ОКИ. Это происходит за счет обезжиривания растительного материала: удаление компонентов, растворимых в щелочи, способствует росту пористости. Введение оксида железа снижает площадь удельной поверхности.

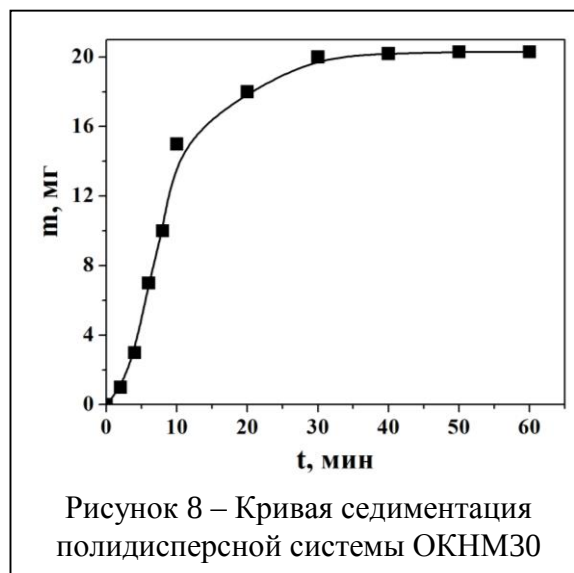
Исследование значения pH точки нулевого заряда ( $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$ ) является важной дополнительной характеристикой сорбентов, определяющей их функциональность по отношению к заряженным сорбатам. Значения  $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$  для изучаемых материалов  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , ОКН и ОКНМ30 составили 6,3; 7,2 и 6,6 соответственно (рис. 6). При меньших значениях pH поверхность образца имеет положительный заряд, при pH выше значения точки нулевого заряда поверхность заряжена отрицательно.

При повышении pH гидроксидом натрия снижается дзета-потенциал поверхности композитов. Это можно объяснить тем, что наличие гидроксид-ионов сжимает диффузионный слой. Из рисунка 7 видно, что во всем исследуемом интервале pH поверхность частиц композитов заряжена отрицательно, и при pH = 7 – 9 значение дзета-потенциала довольно стабильно, что позволяет прогнозировать устойчивость их суспензий в растворах. При pH выше 9 дзета – потенциал уменьшается, и частицы композита имеют тенденцию притяжения, как следствие - коагуляции или флокуляции.



Седиментационные кривые имеют вид, характерный для полидисперсной системы (рис. 8). Начальный прямолинейный участок отвечает оседанию частиц всех размеров. Время достижения седиментационного равновесия магнитного композиционного сорбента составляет примерно 30 минут.

Результаты определения гранулометрического состава изучаемых образцов Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ОКН и магнитных композиционных сорбентов (рис. 9) показали, что все изучаемые образцы имеют неравномерное распределение частиц по размерам и несимметричный вид, указывающий на полидисперсность систем. Образцы магнитных композиционных сорбентов содержат частицы размером 200 – 400 мкм, причем максимум распределения приходится на 300 мкм.



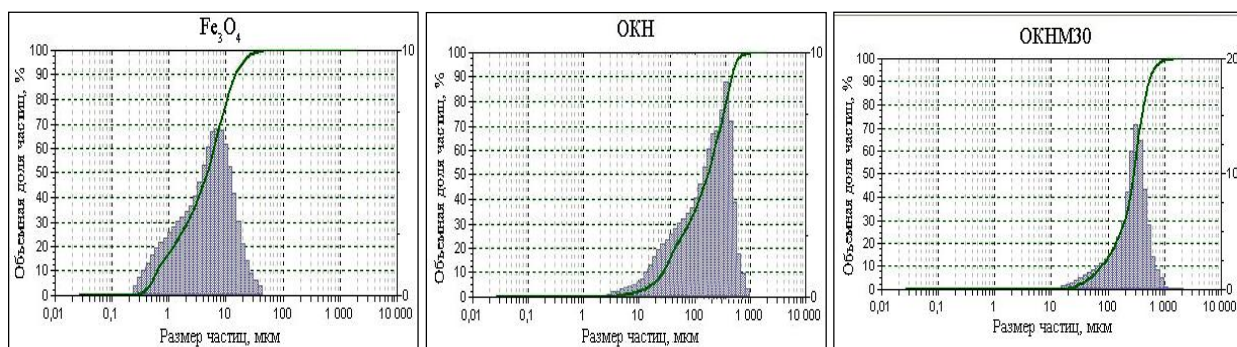


Рисунок 9 – Интегральные кривые и гистограммы распределения по размерам  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , ОКН и ОКНМ30.

### Результаты определения сорбционной способности магнитного композиционного сорбента по отношению к органическим красителям

В данной работе исследовали сорбционную способность магнитного композиционного сорбента ОКНМ30 по отношению к катионным красителям метиленовому голубому (МГ), бриллиантовому зеленому (БЗ) и анионному конго красному (КК) из водных растворов. Естественно было ожидать, что адсорбция катионных красителей будет происходить при высоких значениях pH, выше  $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$  в щелочной области, тогда для анионных красителей оптимальное значение pH ниже  $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$  располагается в кислотной области.

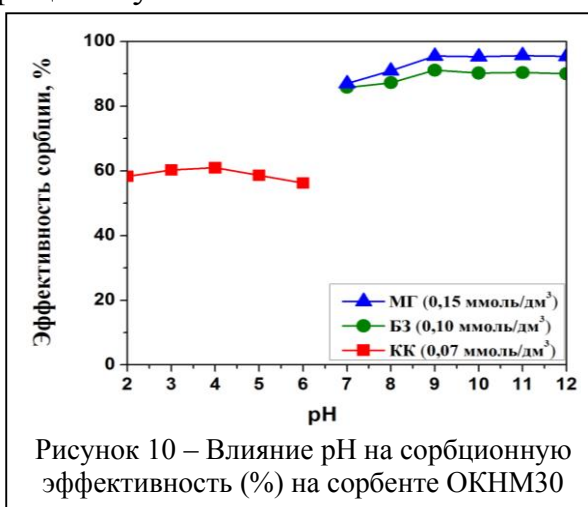


Рисунок 10 – Влияние pH на сорбционную эффективность (%) на сорбенте ОКНМ30

Экспериментальные исследования подтвердили данное предположение. Оказалось, что эффективность сорбции трех красителей на сорбенте ОКНМ30 высока в ожидаемых диапазонах pH, причем внутри этих диапазонов слабо зависит от величины pH (рис. 10).

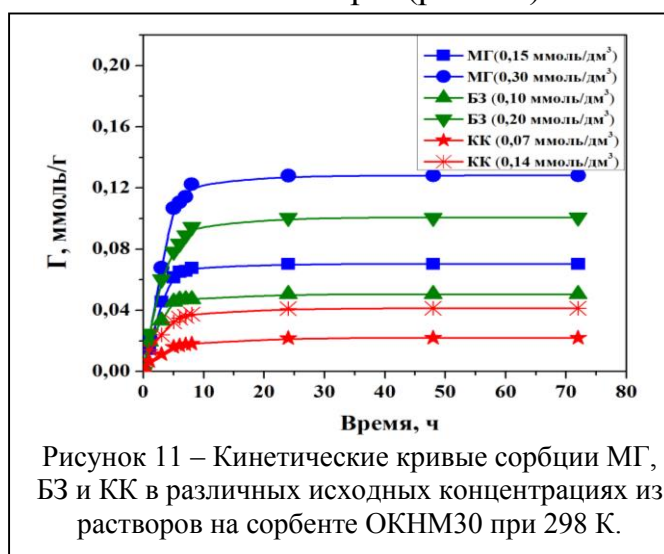


Рисунок 11 – Кинетические кривые сорбции МГ, БЗ и КК в различных исходных концентрациях из растворов на сорбенте ОКНМ30 при 298 К.

Кинетические кривые сорбции красителей из растворов с различными исходными концентрациями на сорбенте ОКНМ30 представлены на рисунке 11. Величину pH растворов поддерживали на уровне 9,0 (МГ и БЗ) и на уровне 4,0 (КК). Время достижения сорбционного равновесия всех трех красителей составляет примерно 7 часов. Дальнейшее увеличение времени экспозиции до 3 суток не приводит к существенному изменению концентрации красителей в растворах.

Анализ кинетических кривых выполнен в рамках известных моделей диффузионной кинетики (рис. 12).

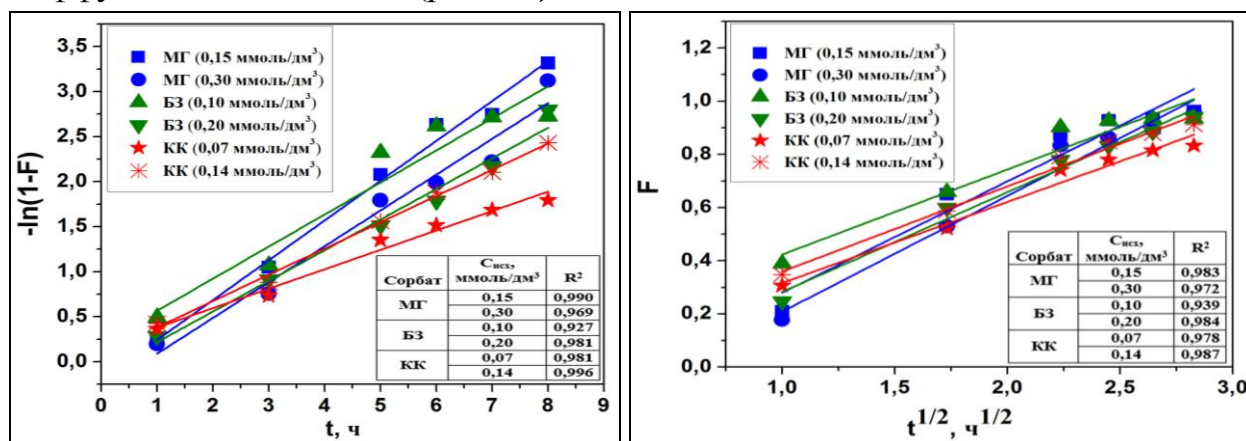


Рисунок 12 – Зависимость  $-\ln(1-F)$  от времени  $t$  (внедиффузионная кинетика) и  $F$  от  $t^{1/2}$  (внутридиффузионная кинетика) при сорбции МГ, БЗ и КК в различных исходных концентрациях на сорбенте ОКНМ30

Удовлетворительные коэффициенты линейной корреляции получены для обеих зависимостей при соответствующих концентрациях красителей. Это позволяет предположить, что процесс сорбции МГ, БЗ и КК протекают в смешаннодиффузионном режиме.

Для описания механизма многостадийного взаимодействия между ионным красителем МГ (0,15 ммоль/дм<sup>3</sup>), БЗ (0,10 ммоль/дм<sup>3</sup>), КК (0,07 ммоль/дм<sup>3</sup>) и магнитным композитом ОКНМ30 была использована мультилинейная диффузионная модель Вебера и Морриса. Из рис. 13 видно, что в процессе сорбции можно выделить три последовательных стадии массопереноса сорбата. Первый крутой участок (1) графика характеризует диффузию молекул красителя из объема раствора через

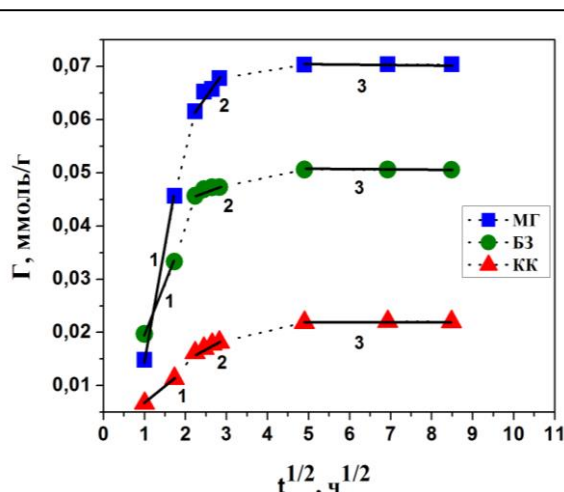


Рисунок 13 – Мультилинейная зависимость  $\Gamma$  от  $t^{1/2}$  при адсорбции МГ, БЗ и КК из растворов при 298 К.

внешний диффузионный слой к поверхности магнитного композита (внедиффузионный массоперенос). Второй участок (2) относится к диффузии молекул красителя внутрь магнитного композита к сорбционным центрам (внутридиффузионный массоперенос). Третий завершающий этап (3), представленный на графике пологим участком, отражает процесс образования связей молекул красителя с функциональными группами сорбента.

Для описания кинетики адсорбции на поверхности твердых веществ применяются модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка. Результаты графической обработки экспериментальных данных для ОКНМ30 в соответствующих координатах представлены на рис. 14. Видно, что обработка

кинетических кривых адсорбции в рамках модели кинетики псевдо-второго порядка дает высокие коэффициенты корреляции (табл. 3). Кроме того, сравнение экспериментальных величин  $\Gamma_{\text{эксп.}}$  со значениями  $\Gamma_{\text{рас.}}$ , полученными при использовании моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядков, свидетельствует о том, что во всех случаях модель псевдо-второго порядка дает лучшее совпадение с экспериментальными результатами. Таким образом, кинетика адсорбции МГ, БЗ и КК магнитным композиционным сорбентом адекватно описывается моделью кинетики псевдо-второго порядка.

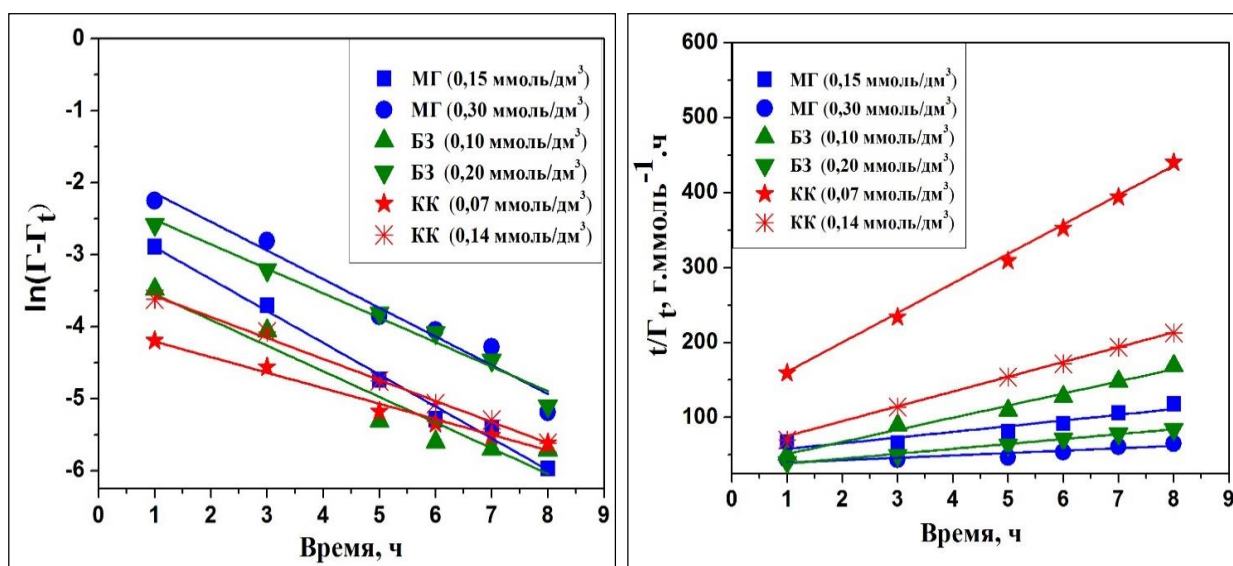


Рисунок 14 – Кинетика псевдо-первого порядка [ $\ln(\Gamma - \Gamma_t) - t$ ] и псевдо-второго порядка ( $t/\Gamma_t - t$ ) адсорбции МГ, БЗ и КК в различных исходных концентрациях на сорбенте ОКНМ30 при 298 К

Таблица 3 - Кинетические параметры адсорбции МГ, БЗ и КК на магнитном композите ОКНМ30.

| Сорбат | С <sub>исх</sub> ,<br>ммоль/дм³ | Γ <sub>эксп</sub> ,<br>ммоль/г | Кинетика<br>псевдо - первого<br>порядка |                                |                | Кинетика<br>псевдо - второго<br>порядка                   |                               |                |
|--------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------|
|        |                                 |                                | K <sub>1</sub> ,<br>ч <sup>-1</sup>     | Γ <sub>рас.</sub> ,<br>ммоль/г | R <sup>2</sup> | K <sub>2</sub> ,<br>г.ммоль <sup>-1</sup> ч <sup>-1</sup> | Γ <sub>рас</sub> ,<br>ммоль/г | R <sup>2</sup> |
| МГ     | 0,15                            | 0,070                          | 0,44                                    | 0,086                          | 0,990          | 10,39                                                     | 0,072                         | 0,998          |
|        | 0,30                            | 0,128                          | 0,40                                    | 0,175                          | 0,968          | 3,93                                                      | 0,133                         | 0,997          |
| БЗ     | 0,10                            | 0,050                          | 0,34                                    | 0,114                          | 0,981          | 21,22                                                     | 0,052                         | 0,999          |
|        | 0,20                            | 0,100                          | 0,35                                    | 0,041                          | 0,926          | 7,12                                                      | 0,103                         | 0,996          |
| КК     | 0,07                            | 0,022                          | 0,22                                    | 0,018                          | 0,981          | 20,46                                                     | 0,023                         | 0,999          |
|        | 0,14                            | 0,041                          | 0,29                                    | 0,037                          | 0,996          | 16,07                                                     | 0,042                         | 0,999          |

Совокупность всех результатов позволяет заключить, что скорость сорбции лимитируется как диффузионными процессами, так и стадией взаимодействия катионов метиленового голубого, бриллиантового зеленого и анионов конго красного с функциональными группами магнитного композиционного сорбента.

С учетом данных о времени установления равновесия в изучаемых системах в дальнейших экспериментах сорбцию проводили на протяжении 24

часов. На рисунке 15 представлены изотермы адсорбции МГ, БЗ и КК на сорбентах  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , ОКН и магнитном композите ОКНМ30 при различных температурах. Параметры изотерм, рассчитанные в рамках моделей Ленгмюра и Фрейндлиха, представлены в таблице 4. Адсорбция МГ, БЗ и КК как на  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , ОКН, так и на магнитном композиционном материале ОКНМ30 хорошо описывается уравнением Ленгмюра и несколько менее адекватно – уравнением Фрейндлиха.

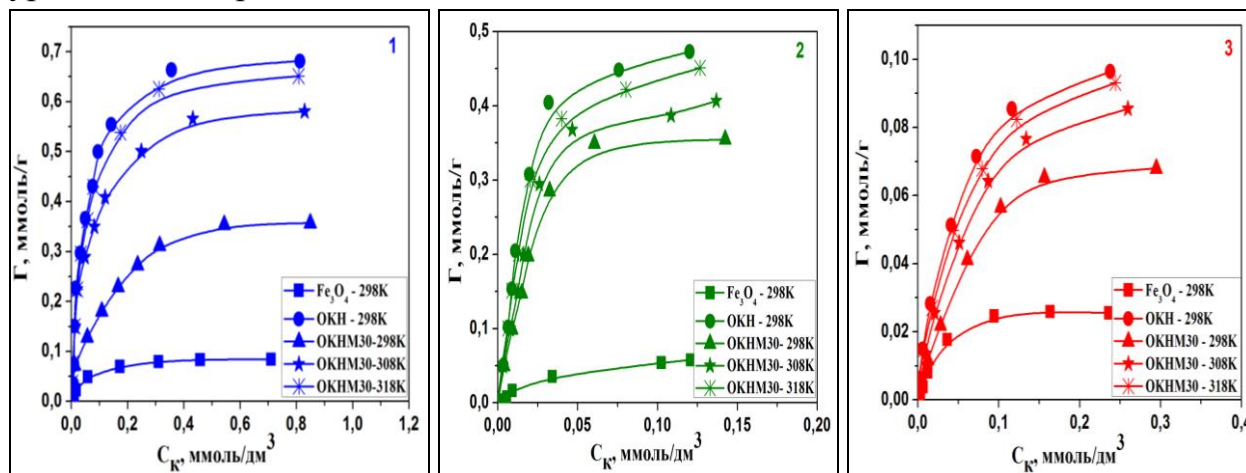


Рисунок 15 – Изотермы адсорбции МГ (1), БЗ (2) и КК (3) на сорбентах  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , ОКН и магнитном композите ОКНМ30 при различных температурах

Таблица 4 - Параметры изотерм адсорбции МГ, БЗ и КК на магнитных сорбентах, рассчитанных по моделям Ленгмюра и Фрейндлиха.

| Сорбат | Сорбент                 | Т, К | Модель Ленгмюра                |                           |       | Модель Фрейндлиха                                                     |      |       |
|--------|-------------------------|------|--------------------------------|---------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------|------|-------|
|        |                         |      | $K_L$ , дм <sup>3</sup> /ммоль | $\Gamma_{\max}$ , ммоль/г | $R^2$ | $K_F$ , ммоль <sup>(1-1/n)</sup> дм <sup>3(1/n)</sup> г <sup>-1</sup> | 1/n  | $R^2$ |
| МГ     | $\text{Fe}_3\text{O}_4$ | 298  | 10,74                          | 0,10                      | 0,954 | 0,19                                                                  | 0,63 | 0,864 |
|        | ОКН                     | 298  | 15,78                          | 0,74                      | 0,911 | 1,97                                                                  | 0,64 | 0,786 |
|        | ОКНМ30                  | 298  | 11,31                          | 0,40                      | 0,987 | 0,46                                                                  | 0,43 | 0,986 |
|        |                         | 308  | 20,29                          | 0,61                      | 0,995 | 1,18                                                                  | 0,52 | 0,914 |
|        |                         | 318  | 23,96                          | 0,71                      | 0,996 | 1,73                                                                  | 0,59 | 0,927 |
| БЗ     | $\text{Fe}_3\text{O}_4$ | 298  | 21,12                          | 0,08                      | 0,991 | 0,61                                                                  | 0,20 | 0,929 |
|        | ОКН                     | 298  | 51,94                          | 0,51                      | 0,977 | 1,96                                                                  | 0,55 | 0,758 |
|        | ОКНМ30                  | 298  | 47,48                          | 0,38                      | 0,998 | 0,80                                                                  | 0,43 | 0,862 |
|        |                         | 308  | 51,79                          | 0,42                      | 0,997 | 1,01                                                                  | 0,46 | 0,867 |
|        |                         | 318  | 58,98                          | 0,46                      | 0,997 | 1,34                                                                  | 0,48 | 0,860 |
| КК     | $\text{Fe}_3\text{O}_4$ | 298  | 28,35                          | 0,03                      | 0,988 | 0,08                                                                  | 0,59 | 0,921 |
|        | ОКН                     | 298  | 20,70                          | 0,12                      | 0,993 | 0,21                                                                  | 0,67 | 0,963 |
|        | ОКНМ30                  | 298  | 13,97                          | 0,09                      | 0,985 | 0,27                                                                  | 0,57 | 0,982 |
|        |                         | 308  | 15,53                          | 0,10                      | 0,997 | 0,28                                                                  | 0,66 | 0,967 |
|        |                         | 318  | 25,55                          | 0,11                      | 0,993 | 0,31                                                                  | 0,64 | 0,975 |

Сравнение максимальной адсорбции для трех красителей на сорбенте ОКНМ30 дает следующий ряд: МГ  $\approx$  БЗ > КК, что объясняется меньшей емкостью монослоя по отношению к более крупной молекуле конго красного.

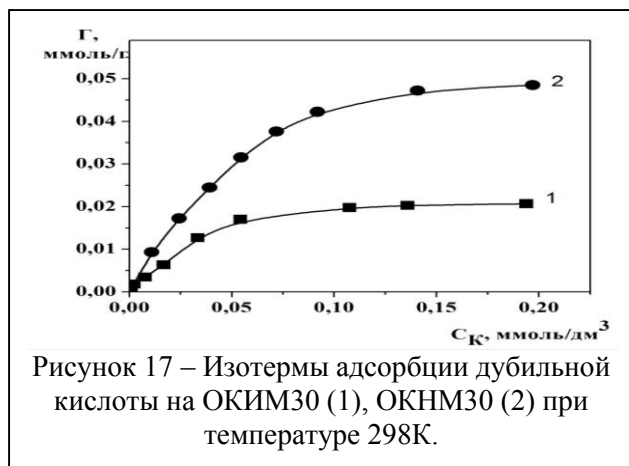
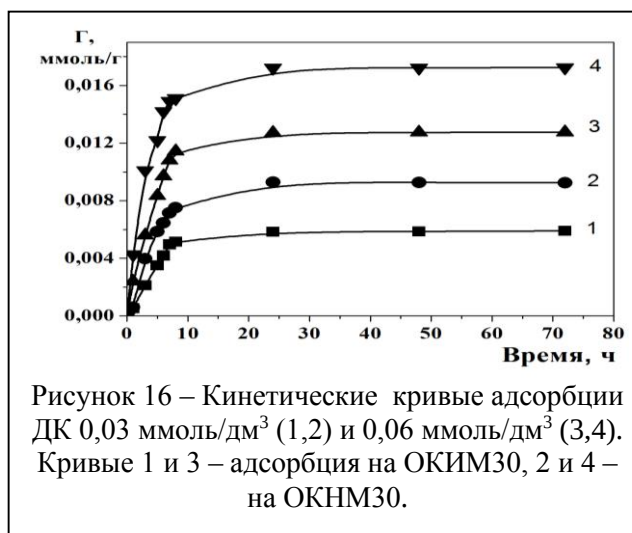
Полученные результаты показали, что магнитный гибридный органо-неорганический материал из отходов кофе, модифицированных щелочью, имеет высокую адсорбционную способность по отношению к катионным и анионным красителям.

## Результаты определения сорбционной способности магнитных композиционных сорбентов по отношению к дубильной кислоте

Проведена оценка сорбционной активности магнитных композиционных сорбентов, в которых использованы необработанные отходы кофе (ОКИМ30) или обработанные раствором щелочи (ОКНМ30), по отношению к органическому веществу ароматического ряда - дубильной кислоте (ДК).

Кинетические кривые адсорбции ДК с концентрацией 0,03 ммоль/дм<sup>3</sup> и 0,06 ммоль/дм<sup>3</sup> на ОКИМ30 и ОКНМ30 при 298 К представлены на рисунке 16.

Изотермы адсорбции дубильной кислоты для всех исследуемых образцов получены при значении pH 4,0 в течение 24 часов при температуре 298 К (рис. 17). Параметры изотерм, рассчитанные в рамках моделей Ленгмюра и Фрейндлиха, представлены в таблице 5.



Приведенные коэффициенты корреляции показывают, что адсорбция дубильной кислоты на магнитных композиционных материалах хорошо описывается обеими моделями - Ленгмюра и Фрейндлиха. Результаты свидетельствуют, что обработка отходов кофе щелочью приводит к улучшению сорбционных характеристик магнитного сорбента.

Таблица 5 – Параметры изотерм адсорбции дубильной кислоты на исследуемых образцах, рассчитанные по моделям Ленгмюра и Фрейндлиха.

| Образец | Модель Ленгмюра                   |                              |       | Модель Фрейндлиха                                                  |       |       |
|---------|-----------------------------------|------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|
|         | $K_L$ ,<br>дм <sup>3</sup> /ммоль | $\Gamma_{\max}$ ,<br>ммоль/г | $R^2$ | $K_F$ ,<br>$\text{ммоль}^{(1-1/n)} \text{дм}^{3(1/n)} \Gamma^{-1}$ | $1/n$ | $R^2$ |
| ОКИМ30  | 30,43                             | 0,025                        | 0,979 | 0,07                                                               | 0,60  | 0,974 |
| ОКНМ30  | 16,08                             | 0,066                        | 0,987 | 0,16                                                               | 0,59  | 0,951 |

## Результаты определения сорбционной способности магнитного композиционного сорбента по отношению к ионам свинца Pb<sup>2+</sup>

На основе анализа кинетических кривых установлено, что сорбция ионов свинца Pb<sup>2+</sup> протекает в смешаннодиффузионном режиме и удовлетворительно описывается уравнением псевдо-второго порядка. Детальный анализ мультилинейной зависимости позволил графически

выделить три отдельных стадии процесса. По-видимому, адсорбция ионов свинца на магнитном композите ОКНМ30 включает не только образование поверхностного комплекса, но и внутреннюю диффузию в поры сорбента.

Построены и проанализированы изотермы адсорбции ионов  $Pb^{2+}$  на сорбентах  $Fe_3O_4$ , ОКН и магнитном композите ОКНМ30 при pH 5,0 в течение 24 часов при различных температурах 298 – 318 К (рис. 18), показано, что изотермы адекватно описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха (табл. 6).

Очевидно, что полученный гибридный органо-неорганический магнитный композит позволяет выполнять очистку воды от катионов тяжелых металлов. Таким образом, полученные нами сорбенты являются многофункциональными.

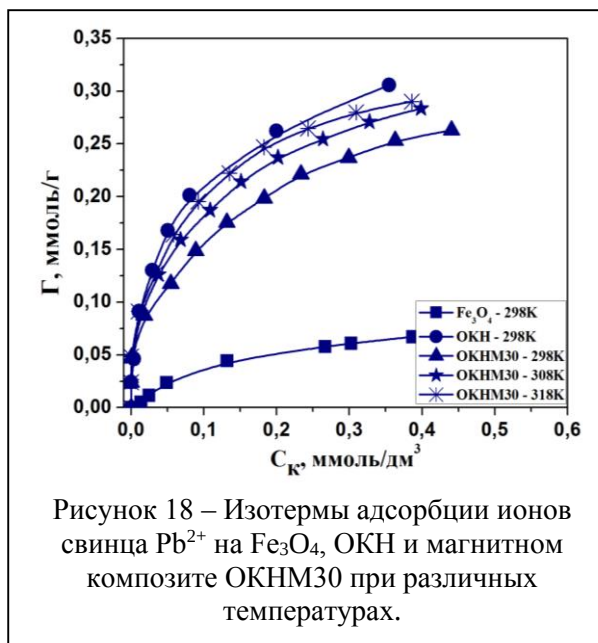


Рисунок 18 – Изотермы адсорбции ионов свинца  $Pb^{2+}$  на  $Fe_3O_4$ , ОКН и магнитном композите ОКНМ30 при различных температурах.

Таблица 6 – Параметры изотерм адсорбции ионов свинца  $Pb^{2+}$  на сорбентах, рассчитанные по моделям Ленгмюра и Фрейндлиха.

| Сорбент   | Т, К | Модель Ленгмюра      |                            |       | Модель Фрейндлиха                            |       |       |
|-----------|------|----------------------|----------------------------|-------|----------------------------------------------|-------|-------|
|           |      | $K_L$ , $дм^3/ммоль$ | $\Gamma_{max}$ , $ммоль/г$ | $R^2$ | $K_F$ , $ммоль^{(1-1/n)} дм^{3(1/n)} г^{-1}$ | $1/n$ | $R^2$ |
| $Fe_3O_4$ | 298  | 8,47                 | 0,074                      | 0,984 | 0,10                                         | 0,57  | 0,863 |
| ОКН       | 298  | 20,05                | 0,321                      | 0,982 | 0,37                                         | 0,28  | 0,924 |
| ОКНМ30    | 298  | 22,42                | 0,275                      | 0,964 | 0,32                                         | 0,29  | 0,974 |
|           | 308  | 29,05                | 0,292                      | 0,978 | 0,34                                         | 0,28  | 0,980 |
|           | 318  | 33,89                | 0,300                      | 0,973 | 0,35                                         | 0,23  | 0,967 |

### Термодинамические параметры сорбции магнитными композитами

Для определения термодинамических параметров адсорбции красителей, дубильной кислоты и ионов  $Pb^{2+}$  на магнитном композите ОКНМ30 строили изотермы адсорбции при различных температурах. Из зависимости  $\ln K$  от обратной температуры (рис. 19) по уравнению Вант-Гоффа были рассчитаны значения  $\Delta H$  и  $\Delta S$  для изученного диапазона температур. Значения свободной энергии Гиббса адсорбции  $\Delta G$  для трех температур рассчитали по уравнению:  $\Delta G = -RT \ln K$ . Полученные термодинамические характеристики процесса адсорбции приведены в таблице 7.

Значения термодинамических параметров свидетельствуют об эндотермическом характере процесса адсорбции для всех изученных сорбатов, об энтропийном факторе как движущей силе процесса и о самопроизвольном протекании процесса.

Значение  $\Delta H < 40 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$  означает, что процесс адсорбции изучаемых сорбатов на сорбенте ОКНМ30 может являться физическим. Однако увеличение сорбции  $\Gamma_{max}$  при повышении температуры системы в изученном

диапазоне характерно скорее для хемосорбции. Кроме того, значения  $\Delta G$  находятся в диапазоне от  $-33$  до  $-40$  кДж·моль $^{-1}$ , что указывает на возможное наличие физической адсорбции и хемосорбции.

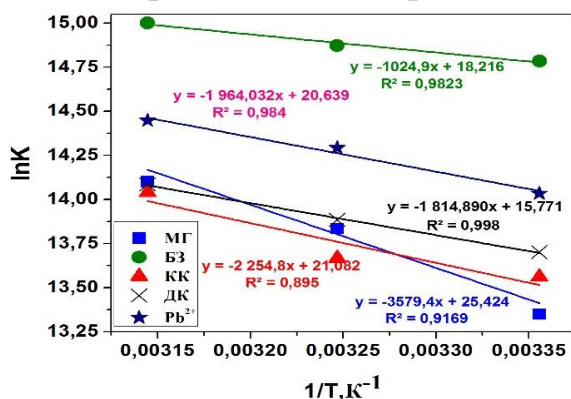


Рисунок 19 – Исходные данные для расчета термодинамических параметров адсорбции.

| Сорбат           | Температура, К | $\Delta G$ , кДж·моль $^{-1}$ | $\Delta H$ , кДж·моль $^{-1}$ | $\Delta S$ , Дж·К $^{-1}$ ·моль $^{-1}$ |
|------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| МГ               | 298            | -33,1                         | 29,8                          | 221,4                                   |
|                  | 308            | -35,7                         |                               |                                         |
|                  | 318            | -37,3                         |                               |                                         |
| БЗ               | 298            | -36,6                         | 8,5                           | 151,5                                   |
|                  | 308            | -38,1                         |                               |                                         |
|                  | 318            | -39,7                         |                               |                                         |
| КК               | 298            | -33,6                         | 18,8                          | 175,3                                   |
|                  | 308            | -35,0                         |                               |                                         |
|                  | 318            | -37,1                         |                               |                                         |
| ДК               | 298            | -33,9                         | 15,1                          | 164,5                                   |
|                  | 308            | -35,5                         |                               |                                         |
|                  | 318            | -37,2                         |                               |                                         |
| Pb <sup>2+</sup> | 298            | -34,8                         | 16,3                          | 171,6                                   |
|                  | 308            | -36,6                         |                               |                                         |
|                  | 318            | -38,2                         |                               |                                         |

С учетом гибридного характера сорбента такой вариант вполне вероятен, то есть процесс адсорбции изучаемых сорбатов на сорбенте ОКНМ30 по механизму может быть как физической адсорбцией за счет электростатических сил, так и хемосорбцией, химическим взаимодействием сорбата с функциональными группами поверхности сорбента.

### Регенерация и утилизация магнитных сорбционных сорбентов

Актуальным является вопрос утилизации отработанных материалов. Для исследования возможности регенерации магнитного композиционного сорбента были проведены эксперименты по десорбции сорбатов с поверхности композита.

Отработанный сорбент извлекали из раствора с использованием неодимового магнита с остаточной магнитной индукцией 1,22 Тесла. Десорбцию сорбатов определяли в статических условиях при температуре 298 К. Для десорбции применяли водные растворы, pH которых варьировали в широких пределах.

Установлено, что при pH 4-10 десорбция практически не протекает для катионных красителей (МГ и БЗ). Наоборот, для анионных веществ (КК и ДК) при pH 2-8 десорбция практически не происходит. По отношению к иону Pb<sup>2+</sup> десорбция практически осуществляется при pH 2 (табл. 8).

Устойчивость сорбента к регенерации проверяли в течение 5 циклов адсорбции - десорбции, результаты представлены в рис. 20.

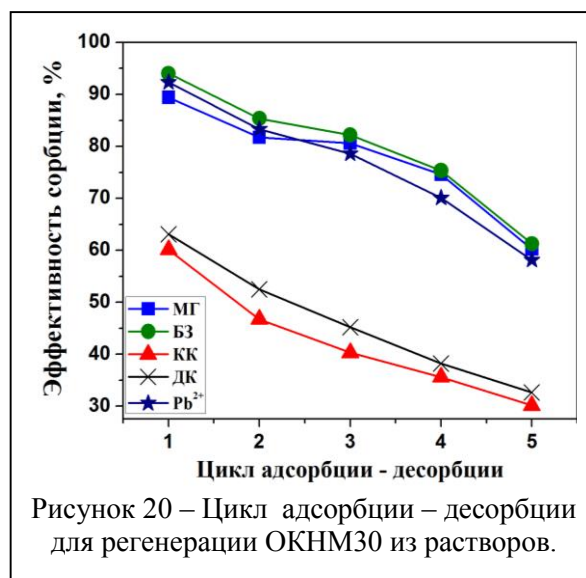


Рисунок 20 – Цикл адсорбции – десорбции для регенерации ОКНМ30 из растворов.

Можно видеть, что эффективность сорбента постепенно снижается. Это снижение может быть связано с несколькими причинами: постепенным насыщением сорбционных центров и неполной десорбцией, а также с деградацией материала из-за довольно низкого значения pH (МГ, БЗ,  $Pb^{2+}$ ), либо, напротив, достаточно высокого (КК, ДК). В то же время прямых свидетельств растворения оксида железа не обнаружено, качественная реакция на железо в растворе после десорбции отрицательна.

Отработанный сорбент может быть складирован или захоронен на полигонах ТБО, поскольку его органическая основа легко подвергается микробиологической деградации.

| Таблица 8 – Эффективность десорбции сорбатов различными растворами |    |                                     |                            |
|--------------------------------------------------------------------|----|-------------------------------------|----------------------------|
| Сорбат                                                             | pH | Реагент                             | Эффективность десорбции, % |
| МГ 0,15 ммоль/дм <sup>3</sup>                                      | 2  | 0,1M HCl                            | 55                         |
| БЗ 0,10 ммоль/дм <sup>3</sup>                                      | 2  | 0,1M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 50                         |
| КК 0,07 ммоль/дм <sup>3</sup>                                      | 10 | 0,1M NaOH                           | 52                         |
| ДК 0,03 ммоль/дм <sup>3</sup>                                      | 10 | 0,1M NaOH                           | 50                         |
| $Pb^{2+}$ 0,10 ммоль/дм <sup>3</sup>                               | 2  | 0,1M HNO <sub>3</sub>               | 60                         |

### Опытно-промышленные испытания магнитного композиционного сорбента

Проведены испытания опытно – промышленной партии магнитного композиционного сорбента на основе отходов кофе, модифицированных щелочью, и частиц оксида железа, на эффективность очистки сточных вод от органических красителей, дубильной кислоты и ионов свинца в Промышленном районе Хоа Хиеп, Фуйен область, Вьетнам, и в Институте химии и окружающей среды Вьетнамской академии наук и технологий (MICER), область Фуйен, Вьетнам. Результаты экспериментов показали, что магнитный композиционный сорбент на основе отходов кофе, модифицированных щелочью, и частиц оксида железа, позволяет достичь высокой эффективности очистки сточных вод и может найти применение на различных предприятиях, особенно с учетом его низкой стоимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые гибридные органо-неорганические материалы на основе отходов кофе, модифицированных щелочью, и частиц оксида железа. Определены оптимальные параметры синтеза магнитных композиционных сорбентов.

Исследованы коллоидно-химические характеристики полученных магнитных композиционных сорбентов: определены размеры удельной поверхности, электрокинетический потенциал, гранулометрический состав.

Определена сорбционная способность магнитных композиционных сорбентов по отношению к органическим веществам - красителям метиленовому голубому, бриллиантовому зеленому, конго красному, дубильной кислоте - и ионам  $Pb^{2+}$  из водных растворов.

Определены термодинамические параметры сорбции на магнитном композиционном сорбенте, значения которых свидетельствуют, что механизм процесса адсорбции изучаемых сорбатов на сорбенте комплексный: физическая адсорбция электростатическими силами и хемосорбция, химическое взаимодействие адсорбата с функциональными группами поверхности сорбента.

Проведены испытания опытно-промышленной партии магнитного композиционного сорбента в Промышленном районе Хоа Хиеп, область Фуйен, Вьетнам, и в Институте химии и окружающей среды Вьетнамской академии наук и технологий (MICER), область Фуйен, Вьетнам.

Магнитный композиционный сорбент на основе отходов кофе, модифицированных щелочью, и частиц оксида железа позволяет достичь высокой эффективности очистки сточных вод, при этом обладает возможностью регенерации и повторного использования.

Теоретические и экспериментальные результаты работы могут быть **рекомендованы** для использования для очистки сточных вод на предприятиях текстильной, легкой, пищевой промышленности, металлургических предприятиях Вьетнама и Российской Федерации, а также для внедрения в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлениям «Химия» и «Химическая технология».

**Перспективы дальнейших исследований** целесообразно рассматривать в направлении расширения способов модифицирования растительного компонента органо-неорганического материала, подбора способов и условий модифицирования для направленного регулирования свойств сорбента в зависимости от природы загрязнителя.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

*В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий,  
рекомендованных ВАК*

1. Фам Тхань Минь. Исследование адсорбции красителей материалами, полученными из отходов молотого кофе / **Фам Тхань Минь**, О. Е. Лебедева // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2017. – Т. 17. – Вып. 5. – С. 756 – 763.
2. Фам Тхань Минь. Изучение кинетики и термодинамики адсорбции Бриллиантового зеленого на магнитном композите / **Фам Тхань Минь**, О. Е. Лебедева // Научные ведомости БелГУ. – 2017. – Вып. 41. – № 25 (274). – С. 5 – 11.
3. Фам Тхань Минь. Исследование адсорбции дубильной кислоты магнитными композиционными сорбентами на основе отходов кофе / **Фам Тхань Минь**, О. Е. Лебедева, Л. В. Фурда // Бутлеровские сообщения. – 2018. – Т. 55. – № 8. – С. 88 - 91.
4. Фам Тхань Минь. Адсорбционные свойства композита магнетита с отходами кофе / **Фам Тхань Минь**, О. Е. Лебедева // Журнал физической химии. – 2018. – Т. 92. – № 10. – С. 1–5.

***В изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus***

5. Pham Thanh Minh. Adsorption Properties of a Magnetite Composite with Coffee Waste / **Pham Thanh Minh**, O. E. Lebedeva // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2018. – Vol. 92. – No. 10. – Pp. 2044–2047.
6. Van Thuan Le, Thanh Minh Pham. Removal of Pb (II) ions from aqueous solution using a novel composite adsorbent of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PVA/spent coffee grounds / Van Thuan Le, **Thanh Minh Pham**, Van Dat Doan, Olga Evgenyevna Lebedeva, Hoai Thuong Nguyen // Separation Science and Technology. – 2019. – Vol. 54. – No. 1.

***В сборниках трудов конференций***

7. Фам Тхань Минь. О возможности использования отходов кофе в сорбционной очистке воды от красителей / **Фам Тхань Минь**, О. Е. Лебедева // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды: сборник докладов часть IV Международной научно-технической конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. – Ч.1. – С. 136 – 140.
8. Фам Тхань Минь. Некоторые свойства сорбентов из отходов кофе / **Фам Тхань Минь**, Ву Тхи Хоай Фыонг, О. Е. Лебедева // Физическая и коллоидная химия – основа новых технологий и современных методов анализа в химической и пищевой отраслях промышленности: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения С.Е. Харина / под общ. ред. проф. Т.А. Кучменко; Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2016. –С. 378.
9. Фам Тхань Минь. Повышение эффективности сорбента из отходов вьетнамского коммерческого молотого / **Фам Тхань Минь**, Ву Тхи Хоай Фыонг // Естественные, инженерные и экономические исследования в технике, промышленности, медицине и сельском хозяйстве: Материалы I Молодёжной научно-практической конференции с международным участием; под общ. ред. С.Н. Девяцовой. – Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. – С. 568 – 570.
10. Фам Тхань Минь. О возможности применения частиц оксида железа в методике магнитной сепарации / **Фам Тхань Минь**, О. Е. Лебедева // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии – 2018: Материалы Международной научно-практической конференции /редкол.: Л. М. Миронович (отв. ред.) [и др.]; Юго- Зап. гос. ун- т., Изд-во ЗАО «Университетская книга», Курск, 2018. – С. 164 – 166.
11. Pham Thanh Minh. Kinetic Studies of Pb<sup>2+</sup> Adsorption from Aqueous Solutions by Coffee Grounds / **Pham Thanh Minh**, O.E. Lebedeva // The 7<sup>th</sup> International IUPAC Conference on Green Chemistry: The conference is organized with the support of the Russian Science Foundation (Agreement No. 15-17-30016). – Moscow, 2017. – С.143.
12. Olga Lebedeva. Low-cost Sorbents from Agricultural Wastes / Olga Lebedeva, Nataliya Gabruk, **Pham Thanh Minh**, Dmitry Smalchenko // The 7<sup>th</sup> International IUPAC Conference on Green Chemistry: The conference is organized with the support of the Russian Science Foundation (Agreement No. 15-17-30016). – Moscow, 2017. – С.142.

***Объект интеллектуальной собственности***

13. Патент № 2661210 Российская Федерация, МПК В01J 20/30, C02F 1/28. **Способ получения композиционного сорбента с магнитными свойствами** / Фам Тхань Минь (VN), Лебедева Ольга Евгеньевна (RU), Ле Ван Тхуан (VN); заявитель и патентообладатель Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ "БелГУ") (RU), Зуйтанский университет (VN) - Заявка № 2017127045; заявл. 27.07.2017, опубл. 13.07.2018, Бюл. № 20. – 9 с.

**ФАМ ТХАНЬ МИНЬ**

**РАЗРАБОТКА СОРБЕНТОВ ИЗ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ ДЛЯ  
ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

02.00.11 – Коллоидная химия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 19.04.2019. Формат 60х84/16  
Гарнитура Times New Roman. Усл. п. л. 1,28. Тираж 100 экз. Заказ  
Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в ИД «Белгород» НИУ «БелГУ»  
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел.: 30-14-48