

## МАГНИТНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРОВ И ИХ ФЛОКУЛИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА

В. Е. Проскурина<sup>1,\*</sup>, Д. О. Сагдеев<sup>1</sup>, С. С. Туганов<sup>1</sup>, Л. Р. Дюкина<sup>1</sup>,  
Э. Б. Цатурян<sup>1</sup>, Ю. Г. Галяметдинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,

Казань, Россия

\*e-mail: v\_proskurina@mail.ru

**Аннотация.** Синтезированы магнитные флокулянты на основе наночастиц магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и природных полисахаридов (хитозан, яблочный и цитрусовый пектин). Функционализацию магнетита проводили при оптимальном соотношении биополимеров и магнетита в смеси 5 : 1. Характеризацию индивидуальных частиц магнетита, полисахаридов, магнитных флокулянтов на их основе осуществляли методом динамического светорассеяния, ИК-спектроскопии и СНН-анализа. Методом ЯМР-релаксометрии показано, что распределение данных систем в биологических средах возможно исследовать при помощи метода магнитно-резонансной томографии. При варьировании концентрации магнитных флокулянтов на основе магнетита и природных полимеров и величины рН среды рассмотрено их влияние на флокулирующие параметры системы. Среди исследуемых магнитных флокулянтов наибольшим флокулирующим эффектом обладает образец МФК при концентрации  $2 \times 10^{-2}$  г/л. Отмечено усиление эффективности флокулообразования в суспензии голубой глины с участием МФК в сильнощелочной области рН. При седиментации глины с участием магнитного флокулянта на основе цитрусового и яблочного пектина отмечен мостичный механизм флокуляции, преимущественно нейтрализационный механизм флокуляции реализуется с участием магнитного флокулянта на основе хитозана. Показано, что высокоэффективный многофункциональный флокулянт является селективным для разделения многокомпонентных дисперсных систем.

**Ключевые слова:** магнетит, биополимер, магнитная флокуляция, голубая глина, ЯМР-релаксация

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от FZSG-2026-0003.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

**Ссылка для цитирования:** Проскурина В.Е., Сагдеев Д.О., Туганов С.С., Дюкина Л.Р., Цатурян Э.Б., Галяметдинов Ю.Г. Магнитные наноконпозиты на основе биополимеров и их флокулирующие свойства. *Коллоидный журнал / Colloid journal*. 2026. Т. 88. № 1. С. 56–69. <https://doi.org/10.31851/S0023291226010043>

Поступила в редакцию 03.07.2025

После доработки 23.10.2025

Принята к публикации 23.10.2025

## MAGNETIC NANOCOMPOSITES BASED ON BIOPOLYMERS AND THEIR FLOCCULATING PROPERTIES

V. E. Proskurina<sup>1,\*</sup>, D. O. Sagdeev<sup>1</sup>, S. S. Tuganov<sup>1</sup>, L. R. Dyukina<sup>1</sup>, E. B. Tsaturyan<sup>1</sup>,  
Yu. G. Galyametdinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

\*e-mail: v\_proskurina@mail.ru

*Abstract.* Magnetic flocculants based on Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetite nanoparticles and natural polysaccharides (chitosan, apple and citrus pectin) have been synthesized. Functionalization of magnetite was carried out at the optimal ratio of biopolymers and magnetite of 5 : 1. The characterization of individual particles of magnetite, polysaccharides, and magnetic flocculants based on them was carried out by dynamic light scattering, IR spectroscopy and CHN-analysis. Using NMR-relaxometry method, it was shown that the distribution of these systems in biological environments can be studied using magnetic resonance imaging. When varying the concentration of magnetic flocculants based on magnetite and natural polymers and the pH value of the medium, their effect on the flocculating parameters of the system is considered. Among the studied magnetic flocculants, the MFC sample has the greatest flocculating effect at a concentration of 2·10<sup>-2</sup> g/L. An increase in the efficiency of flocculation in a suspension of blue clay with the participation of MFC in the highly alkaline pH region was noted. During sedimentation of clay with the participation of a magnetic flocculant based on citrus and apple pectin, a bridging flocculation mechanism has been established, mainly the neutralization mechanism of flocculation is realized with the participation of a magnetic flocculant based on chitosan. It is shown that a highly effective multifunctional flocculant is selective for the separation of multicomponent dispersed systems.

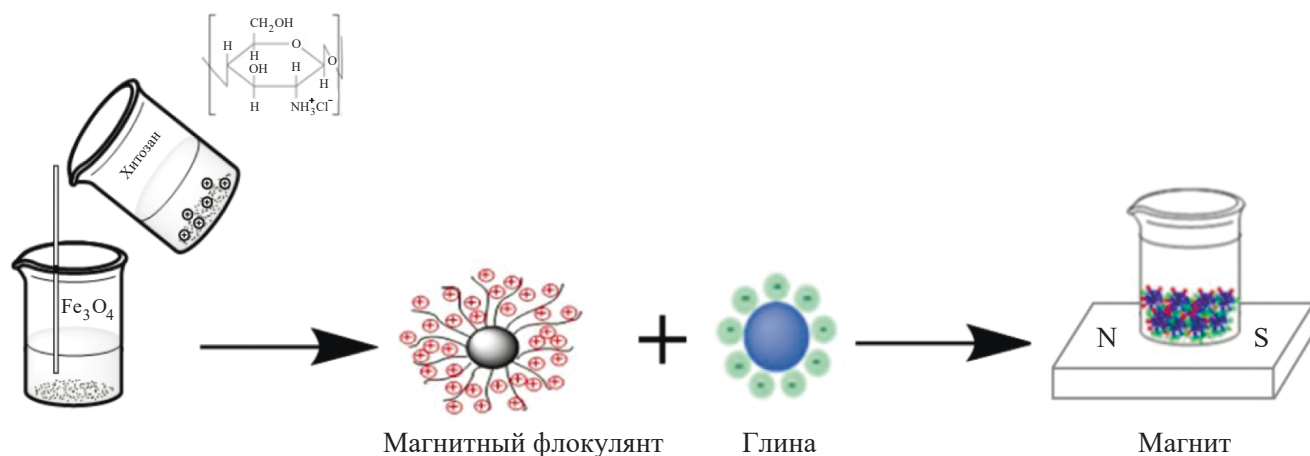
*Keywords:* magnetit, bioflocculant, magnetic flocculation, blue clay, NMR-relaxation

*Funding.* The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment for the provision of public services (performance of works) from FZSG-2026-0003.

*Conflict of interests.* The authors of this work declare that they have no conflict of interest.

*For Citation:* Proskurina V.E., Sagdeev D.O., Tuganov S.S., Dyukina L.R., Tsaturyan E.B., Galyametdinov Yu.G. Magnetic Nanocomposites Based on Biopolymers and Their Flocculating Properties. *Kolloidnyy Zhurnal / Colloid Journal*. 2026;88(1):56-69. (In Russ.) <https://doi.org/10.31851/S0023291226010043>

Received July 03, 2025  
Revised October 23, 2025  
Accepted October 23, 2025



## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день актуальными являются исследования, направленные на разработку и изучение свойств магнитных наночастиц (МНЧ) для их применения при очистке и концентрировании биожидкостей (клеток, ДНК, РНК, нуклеиновых кислот, пептидов) [1], адресной доставке лекарств [2], очистке воды [3, 4], в качестве сорбентов металлов и неметаллов, органических соединений и в различных областях химического анализа [5]. Учитывая склонность наночастиц магнетита к неконтролируемой агрегации в физиологических средах, для снижения их полидисперсности реализуют функционализацию его поверхности с помощью положительно и отрицательно заряженных биополимеров (хитозан, цитрусовый и яблочный пектин). В качестве перспективных наноматериалов исследователи рассматривают магнитные флокулянты [6–8], которые могут обеспечивать высокоселективное разделение в многокомпонентных дисперсных системах. Магнитный флокулянт состоит из наноразмерного магнетита, выступающего в качестве ядра, покрытого защитным органическим слоем – природным полимером, несущим специфические функциональные группы [9]. Ключевой новизной магнитных нанокомпозитов является то, что наночастицы и флокулянт, входящие в их состав являются многоазовыми. В литературе [10, 11] имеются сведения об использовании магнитных флокулянтов на основе магнитных наночастиц и синтетических сополимеров акриламида для разделения фаз в дисперсных системах. В продолжение систематических исследований в области флокуляции наряду с синтетическими магнитными нанокомпозитами представляло интерес оценить флокулирующее поведение магнитных флокулянтов на основе природных полисахаридов. Биосовместимость, термостабильность, подавление роста и развития микроорганизмов, усиление иммунного ответа – это преимущества инновационных магнитоуправляемых нанокомпозитов, основу

которых составляют природные полимеры. В современной научной литературе увеличивается количество публикаций по применению магнитных флокулянтов на основе природных полимеров в диагностических методах, таких как магнитно-резонансная томография и биосенсорика, для удаления тяжелых металлов из водных растворов, повышения эффективности удаления мутности сточных вод, что является отражением растущего интереса к данному типу магнитных флокулянтов. Магнитный флокулянт карбоксиметилхитозана, привитый со-полиакриламидом 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновой кислоты, эффективен для флокуляционного удаления Cr (III), Co (II) и Pb (II) [12]. В работе [13] были синтезированы флокулянты, содержащие целлюлозу и магнитные наночастицы оксида железа, методом одностадийного соосаждения. Натуральные модифицированные полимерные флокулянты экологичны, экономичны и эффективны, а их флокулирующие свойства можно улучшить за счет прививочной модификации [14]. В области кондиционирования и обезвоживания осадка синтез натуральных модифицированных полимерных флокулянтов необходим и целесообразен. Применение магнитных флокулянтов для очистки сточных вод нефтеперерабатывающих заводов от мутности рассмотрено в работе [15]. Благодаря своей хорошей биосовместимости, низкой токсичности, антибактериальным и противогрибковым свойствам хитозан занимает уникальное положение в биоматериалах и является единственным положительно заряженным природным полисахаридом [16]. Пектин обладает рядом ценных свойств, включая способность прилипать к слизистым оболочкам, биосовместимость и отсутствие токсичности [17]. Магнитные сорбенты сочетают в себе высокую сорбционную способность благодаря развитой удельной поверхности и магнитные свойства, характерные для оксидов железа, преимущественно для магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), который демонстрирует при комнатной температуре ферримагнетизм с намагниченностью, достигающей  $92 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$  [18–20].

Изменяя параметры магнитного поля, можно регулировать плотность упаковки частиц и таким образом управлять их магнитными свойствами и агрегативной устойчивостью. Магнитная флокуляция применяется в процессах функционализации поверхности наночастиц, поскольку агрегированные структуры могут быть покрыты различными стабилизаторами, такими как полимеры или биоактивные молекулы. Это улучшает их диспергируемость в биологических средах и расширяет возможности их применения в биомедицине. В процессе взаимного притяжения частиц магнетита и биофлокулянта под воздействием внешнего магнитного поля образуются агрегаты, которые характеризуются более высокой прочностью [21].

На сегодняшний день имеется большой ассортимент различных по своей природе флокулянтов, однако отсутствует универсальный реагент для выделения широкого спектра загрязняющих веществ не только в крупнотоннажных производствах, но и в молекулярной инженерии [22–25]. В качестве одного из таких реагентов рассматривается магнитоуправляемый наноккомпозит на основе наночастиц магнетита и полисахарида, характеризующийся биосовместимостью, дополнительной термостабильностью, антимикробными и иммуногенными свойствами. Магнитные флокулянты позволяют реализовать принципиально новый подход для разделения и концентрирования биологических дисперсных систем, основанный на явлении супермагнетизма [26]. Кроме того, ферромагнитные свойства наночастиц магнетита позволяют проводить анализ их распределения в биологических системах при помощи магнитно-резонансных методов, так как

их введение приводит к снижению времен спин-решеточной и спин-спиновой релаксации протонов воды.

Цель настоящей работы заключалась в получении и сравнении флокулирующих параметров магнитных наноккомпозитов на основе МНЧ и биополимеров в процессах седиментации суспензии голубой глины в режиме свободного (нестесненного) оседания.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

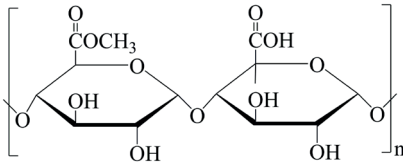
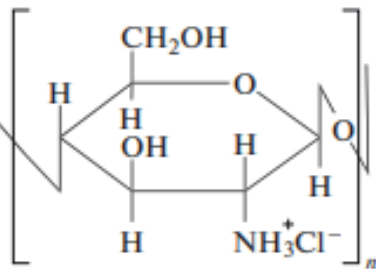
### Объекты исследования

В качестве флокулирующих агентов были выбраны природные полисахариды, основные характеристики которых представлены в табл. 1. Растворение хитозана проводили в 0.05 М растворе HCl (х.ч., ООО «Компонент-реактив»).

Для синтеза магнетита в работе использовали следующие реагенты: хлорид железа (III) 6-водный (Химкрафт), сульфат железа (II) 7-водный (ООО «ХИМКРАФТ»), аммиак водный (осч 25–3, ООО «СигмаТек»), цитрат натрия (ООО НПФ «ТатХимПродукт»).

Модифицированные варианты метода Рене Массарта [27–29] указывают на то, что наиболее важными параметрами, влияющими на форму, размер и состав частиц, являются молярное соотношение Fe(II)/Fe(III), природа осадителя, температура и продолжительность нагревания. Частицы магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> требуемого состава были получены методом соосаждения солей двух- и трехвалентного железа в присутствии гидрата аммиака при молярном соотношении Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> = 2 : 1 по методике,

Таблица 1. Основные параметры флокулирующих агентов\*

Название флокулянта	Химическая формула повторяющихся звеньев	Условные обозначения флокулянтов	β, мол. %	M, кДа
Цитрусовый пектин		A1	26	33
Яблочный пектин		A2	10	40
Хитозан		K	90	108

\* β – концентрация ионогенных звеньев, мол. %; M – молекулярная масса биополимеров, кДа.

описанной в статьях [20, 30], в качестве стабилизатора использовали цитрат натрия. Для этого в 100 мл деионизированной воды растворяли 1.032 г цитрата натрия. Взаимодействие цитрат-иона ( $C_6H_5O_7^{3-}$ ) с поверхностью магнетита происходит по двум направлениям: хемосорбция и электростатическая стабилизация (образование двойного электрического слоя). В результате хемосорбции на поверхности частицы магнетита прочно закрепляются отрицательно заряженные цитрат-ионы, создающие сильный отрицательный заряд. Помимо этого, цитрат является отличным хелатирующим агентом для ионов железа, что обеспечивает прочную адсорбцию и долговременную стабильность. Таким образом, стабилизация цитратом натрия – это эффективный метод придания частицам магнетита высокого отрицательного дзета-потенциала  $-45.4$  мВ, указанное значение гарантирует получение стабильного, коллоидного раствора магнитных наночастиц. Цитрат-ион обычно используется в синтезе наночастиц для биомедицинских применений, а именно в качестве контрастных агентов для МРТ [31]. После нагревания реакционной смеси в колбе с перемешиванием магнитной мешалкой до  $80^\circ C$  и заполнения колбы аргоном в нее добавляли 278 мг  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  и 540 мг  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ . После растворения солей в течение 30 минут прикапывали 10 мл аммиака водного в атмосфере аргона. Очистку наночастиц проводили трехкратной промывкой дистиллированной водой с осаждением наночастиц при помощи постоянного магнита. Методом динамического светорассеяния определены размеры синтезированных наночастиц магнетита  $d = 75.9$  нм. Затем получали магнитные биофлокулянты. К  $0.1$  г/дм<sup>3</sup> водным растворам хитозана, цитрусового и яблочного пектина добавляли дисперсию магнетита с концентрацией  $10$  г/дм<sup>3</sup>. Смесь обрабатывали ультразвуком в ультразвуковой ванне в течение 40 мин с последующим механическим перемешиванием при температуре  $60^\circ C$  в течение 2 ч. Полученные наночастицы магнетита, покрытые биополимером, несколько раз промывали методом магнитной декантации. Синтезированные магнитные флокулянты (МФ): МФК – магнитный флокулянт на основе магнетита и хитозана, МФА1 – магнитный флокулянт на основе магнетита и цитрусового пектина, МФА2 – магнитный флокулянт на основе магнетита и яблочного пектина сушили в вакуумной печи при  $105^\circ C$  в течение 24 ч. Методом электрофоретического рассеяния света определены дзета-потенциалы водных растворов МФ: МФА1 ( $\zeta = -17.9$  мВ), МФА2 ( $\zeta = -30.8$  мВ), МФК ( $\zeta = +3.48$  мВ). МФ в виде  $0.1\%$  водных растворов вводили непосредственно перед стадией перемешивания суспензии голубой глины, которое осуществляли дисковой мешалкой с 12 отверстиями путем 10-кратного медленного ее перемещения в вертикальном направлении. Концентрация МФ варьировалась от  $0.5 \times 10^{-2}$  до  $2.0 \times 10^{-2}$  г/л.

Оценку флокулирующего поведения изучаемых реагентов проводили в режиме свободного (нестесненного) оседания на дисперсной системе – суспензии голубой глины со средним размером частиц  $R_{cp} = 8.9 \cdot 10^{-5}$  м, электрокинетическим потенциалом

$\zeta = -11$  мВ и плотностью  $\rho = 1.34$  г/см<sup>3</sup>. Голубая глина (ГГ) – это природный алюмосиликатный материал с включениями минералов и микроэлементов, содержащий монтмориллонит, каолинит, иллит и в качестве микроэлементов Cu, Zn, Mn, Co, Se, сульфиды и карбонаты. Голубоватый оттенок глины связан с наличием железа ( $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ), примесей меди или титана. Глина Кизлярского месторождения, Дагестан (Северный Кавказ) ГОСТ 21286-82. Химический состав использованной в экспериментах голубой глины (масс. %) следующий:  $55.3 SiO_2$ ;  $19.9 Al_2O_3$ ;  $7.0 Fe_2O_3$ ;  $3.0 MgO$ ;  $2.68 K_2O$ ;  $3.48 CaO$ ;  $1.6 Na_2O$ ;  $7.04 H_2O$ . Концентрация частиц глины в суспензии  $0.8\%$  [32].

#### Методы исследования

На седиментометре СВ-1 проводилась оценка гранулометрических показателей исследуемой суспензии методом седиментационного анализа. Обработка кривой седиментации позволила получить интегральную кривую распределения по размерам частиц голубой глины (рис. 1), отмечена сравнительно небольшая полидисперсность по размерам у суспензии голубой глины ( $R_{min} = 6.5 \cdot 10^{-5}$  м и  $R_{max} = 20 \cdot 10^{-5}$  м). Для создания магнитного поля использовали неодимовый магнит N38 ( $12.5$  кГс) диаметром  $60$  мм, толщиной  $30$  мм. Неодимовый магнит был установлен в нижней части измерительного цилиндра. С помощью датчика Холла измерена величина магнитного поля:  $10.8$  мТл.

Для количественной оценки флокулирующих показателей были рассчитаны интегральные флокулирующие эффекты  $D$  по формуле [33]:

$$D = \frac{\bar{u}_i}{u_0} - 1,$$

где  $\bar{u}_i, u_0$  – средние скорости седиментации суспензии голубой глины, соответственно в присутствии полимеров и магнитных флокулянтов (концентрации  $C$ ) и в их отсутствие, м/с.

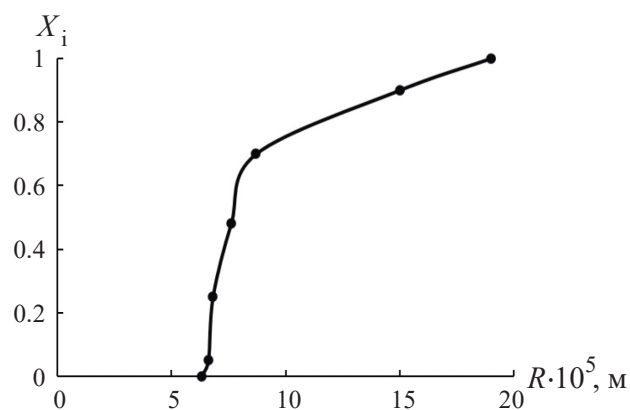


Рис. 1. Интегральная кривая распределения по размерам частиц голубой глины при  $C_{ДФ} = 0.8\%$ .  $X_i$  – интегральная массовая доля всех фракций с размерами частиц  $R \leq R_i$ ;  $R$  – радиус частиц голубой глины, м

Методом статического рассеяния света определили молекулярную массу природных полисахаридов. Измеряется среднее значение интенсивности рассеянного света для разных концентраций исследуемого образца и сравнивается с интенсивностью рассеянного света стандартного образца. Средний размер частиц магнетита определяли методом динамического рассеяния света на анализаторе размера частиц и дзета-потенциала серии Zetasizer Nano-ZS, оснащенный гелий-неоновым лазером (633 нм, 4 мВт). Графическую интерпретацию результатов измерения получали с помощью программного обеспечения "DTS Application Software" (Malvern Instruments). Определение  $\zeta$ -потенциала в водных дисперсных системах осуществляли методом электрофоретического рассеяния света с применением технологии M3-PALS (использование быстро и медленно переменного электрического поля наряду с фазовым и частотным анализом рассеянного света). Ошибки измерений размера и  $\zeta$ -потенциала частиц составили  $\pm 2\%$  и  $\pm 0.12$  мкм·см/(В·с<sup>-1</sup>) соответственно.

ИК-спектры записывали на Фурье-спектрометре ALPHA-T S/N102706 ("Bruker") в спектральном диапазоне от 375–4000 см<sup>-1</sup>, разрешением 4 см<sup>-1</sup>, в таблетках с KBr.

СНН-элементный анализ был проведен на анализаторе Vario EL Cube Elementar, Германия.

Число частиц дисперсной фазы (ДФ)  $N_{\text{ч}}$  (частицы голубой глины) были рассчитаны по формуле:

$$N_{\text{ч}} = \frac{\sum m_i}{m_i}, \text{ где } \sum m_i = 0.8 \text{ г} - \text{масса всех частиц}$$

ДФ,  $m_i$  – масса частицы, г.

$m_i = 4/3\pi R^3 \rho$ , где  $R$  – радиус частицы голубой глины, м;  
 $\rho$  – плотность частиц, г/см<sup>3</sup>.

Расчет числа макромолекул биополимера:

$$N_{\text{м}} = X m_{\text{п}}, \text{ где } m_{\text{п}} - \text{масса полимера, г/100 мл.}$$

$X$  – число макромолекул – определяется из расчета молекулярная масса биополимера (хитозана)  
 $M = 108000 \text{ г}/N_{\text{А}}$ .

$\frac{N_{\text{м}}}{N_{\text{ч}}}$  – соотношение количества макромолекул МФ и частиц голубой глины.

Определение времен релаксации проводили на установке «Спин Трэк» производства компании «Резонансные системы» при помещении раствора в постоянное магнитное поле мощностью 0.5 Тл.

Время спин-решеточной релаксации  $T_1$  измеряли методом  $90^\circ - \tau - 90^\circ$ , т.е. двукратным воздействием поперечным радиочастотным импульсом с последующим построением кривой восстановления продольной намагниченности. Время спин-спиновой релаксации  $T_2$  измеряли при помощи последовательности  $90$  и  $180^\circ$  импульсов Карра-Парселла-Мейбума-Гилла (CPMG или «спин-эхо»).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Анализ ИК-спектров магнитных флокулянтов

Формирование магнитных наноконкомпозитов подтверждали методом ИК Фурье-спектроскопии. С этой целью были получены ИК-спектры магнетита, хитозана, цитрусового и яблочного пектина и МФ на их основе. Пик для магнетита (рис. П1) составляет около 564 см<sup>-1</sup> (вибрация Fe–O), что объясняется присутствием Fe–O в Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Цитрат-ион, используемый в качестве стабилизатора, означает протонированную форму лимонной кислоты. Пик 3363 см<sup>-1</sup> соответствует валентным колебаниям O–H группы, пик 1391 см<sup>-1</sup> – валентным колебаниям C–O связи и деформационным колебаниям O–H группы. Для хитозана [34] отмечается острый пик (амид I) 1665 см<sup>-1</sup> и пик (амид II) 1590 см<sup>-1</sup>. Присутствие полос поглощения 1521 и 1322 см<sup>-1</sup> подтверждает высокую степень деацетилирования исходного образца хитозана и его катионную форму, обусловленную присутствием групп NH<sub>3</sub><sup>+</sup>. ИК-спектр МФК демонстрирует характерные полосы поглощения хитозана и магнетита, что подтверждает успешную функционализацию. Хитозан образует водородные связи с поверхностными гидроксильными группами магнетита =Fe–OH, что приводит к изменению формы полосы (3000–3500) см<sup>-1</sup>. В спектре МФК полоса Fe–O около 580 см<sup>-1</sup> сдвинута по сравнению с чистым магнетитом. В ИК-спектре зафиксирован сдвиг полосы N–H 1590 см<sup>-1</sup> до 1560 см<sup>-1</sup>. В ИК-спектре образца (A1) цитрусового пектина (рис. П2) присутствуют характеристические полосы поглощения: полоса с максимумом при 3423 см<sup>-1</sup> – валентные колебания O–H-группы; полоса с максимумом при 2936 см<sup>-1</sup> – валентные колебания C–H-связей; 1746 см<sup>-1</sup> – валентные колебания карбонильной группы >C=O, связанной с метоксильными группами; 1620 см<sup>-1</sup> и 1442 см<sup>-1</sup> – асимметричные и симметричные валентные колебания ионизированной карбоксильной группы COO<sup>-</sup>; полоса с максимумами при 1102 см<sup>-1</sup> эфирная группа –C–O–C–, 1050 и 1016 см<sup>-1</sup> валентным колебаниям (C–C, C–O) пиранозных колец.

Согласно результатам ИК-спектроскопии, подтверждается состав композита, однако новых связей между полисахаридами и магнетитом не обнаружено, следовательно, химического взаимодействия макромолекул адсорбата с отрицательно заряженной поверхностью магнетита не наблюдается. Поэтому можно говорить лишь о физической адсорбции полисахаридов на поверхности магнетита.

Для оценки доли органической фазы в полученных флокулянтах на примере образца МФК нами был проведен СНН-элементный анализ. Согласно данным СНН-анализа, найдено, %: С 20.37; Н 3.15; N 3.88. Исходя из СНН-анализа, в пробе присутствует 45% хитозана, состав которого близок по составу мономерного звена деацетилированного хитозана ((C<sub>6</sub>H<sub>11</sub>O<sub>4</sub>)<sub>n</sub>, %: С 44.72; Н 6.88; N 8.69) с учетом степени деацетилирования.

В статье [35] методом вибрационной магнитометрии представлена величина удельного магнитного момента насыщения для наночастиц магнетита.

Магнитные свойства полученных наночастиц магнетита подтверждены методом магнитной релаксометрии. Релаксивности были рассчитаны по методике, описанной в статье [36]. Релаксивность  $r_2$  МНЧ относительно времени спин-спиновой релаксации дистиллированной воды составляет  $61 \text{ мМ}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , в отношении спин-решеточной релаксации  $r_1 = 12.8 \text{ мМ}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , что сопоставимо с литературными данными для аналогичных систем [37–39].

Также показано, что и флокулянт обладает выраженными магнитными свойствами. Время спин-решеточной релаксации  $T_1$  водного раствора хитозана составляет  $1792.8 \text{ мс}$ , спин-спиновой релаксации  $T_2 = 746.3 \text{ мс}$  против  $71.25$  и  $9.3 \text{ мс}$ , соответственно, у образца аналогичной концентрации, содержащего наночастицы магнетита (рис. 2). Релаксивность  $r_2$  магнитных наночастиц относительно чистого хитозана составила  $98.78 \text{ мМ}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $r_1 = 12.54 \text{ мМ}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Таким образом, показано, что в присутствии хитозана увеличивается релаксивность МНЧ, что позволяет идентифицировать магнитный флокулянт в средах в том числе при помощи релаксометрических методов.

#### *Флокулирующие свойства магнитных флокулянтов на основе наночастиц магнетита и биополимеров*

На следующем этапе исследования были установлены закономерности флокулирующего действия различных по природе магнитных флокулянтов на суспензии голубой глины в режиме свободного (нестесненного)

оседания под действием внешнего магнитного поля. Сила, с которой магнитное поле действует на магнитную частицу, определяется магнитофоретической силой [40], ее величина зависит от интенсивности намагничивания и формы магнитной частицы. В магнитном поле на магнитные частицы наряду с магнитофоретической силой действуют сила тяжести, гидродинамическое сопротивление и силы взаимодействия между частицами [35]. Исходя из анализа литературных данных [41], выяснили, что необходим оптимальный диапазон размера магнитных наночастиц от  $50$  до  $100 \text{ нм}$  для того, чтобы сохранялась нужная намагничиваемость, и при этом была достаточно высокая агрегативная и седиментационная устойчивость данных частиц с сохранением высокой площади поверхности для последующего взаимодействия с полимерными составляющими магнитного флокулянта. Была проведена серия опытов по флокуляции суспензии голубой глины при трех соотношениях биополимеров и магнетита  $5 \div 1$ ,  $10 \div 1$ ,  $20 \div 1$ . Оценочным параметром служили значения флокулирующего эффекта  $D$ . Результаты по флокулирующему эффекту представлены в табл. 2, по данным которой отчетливо прослеживаются более низкие значения параметра  $D$  при соотношениях биополимеров и магнетита  $10 \div 1$ ;  $20 \div 1$ . При  $D > 0$  МФ ускоряет процесс седиментации и работает как флокулянт. Поэтому для анализируемых МФ во всех последующих экспериментах функционализацию магнетита проводили при оптимальном соотношении биополимеров и магнетита в смеси  $5 : 1$ .

Предположительно, магнитофоретическая сила превышает гидродинамическое сопротивление, поэтому магнитный наноккомпозит МФК быстро перемещается

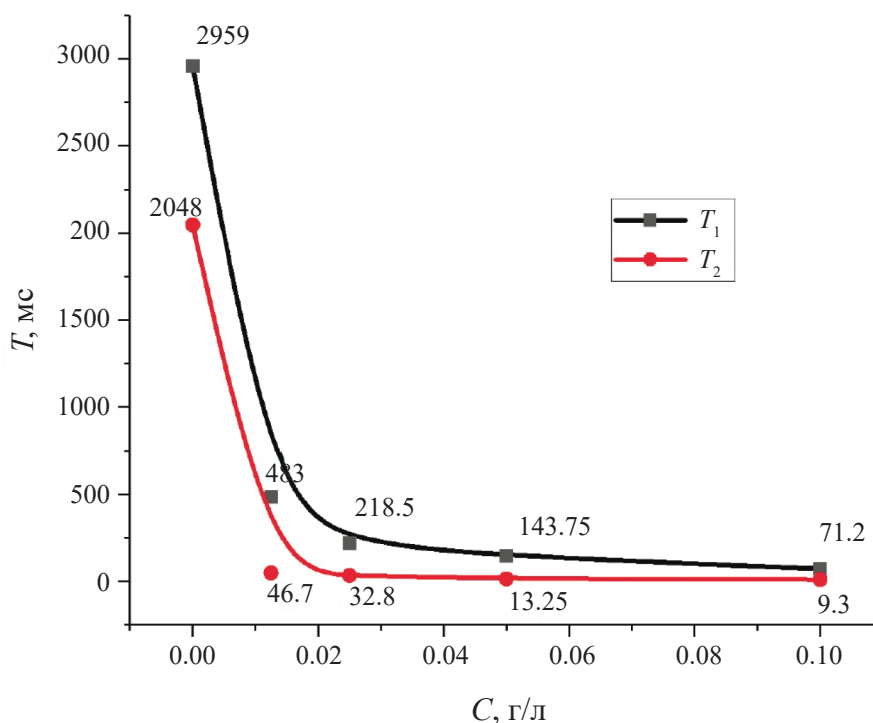


Рис. 2. Зависимость времени релаксации протонов от концентрации комплекса «хитозан + наночастицы магнетита»

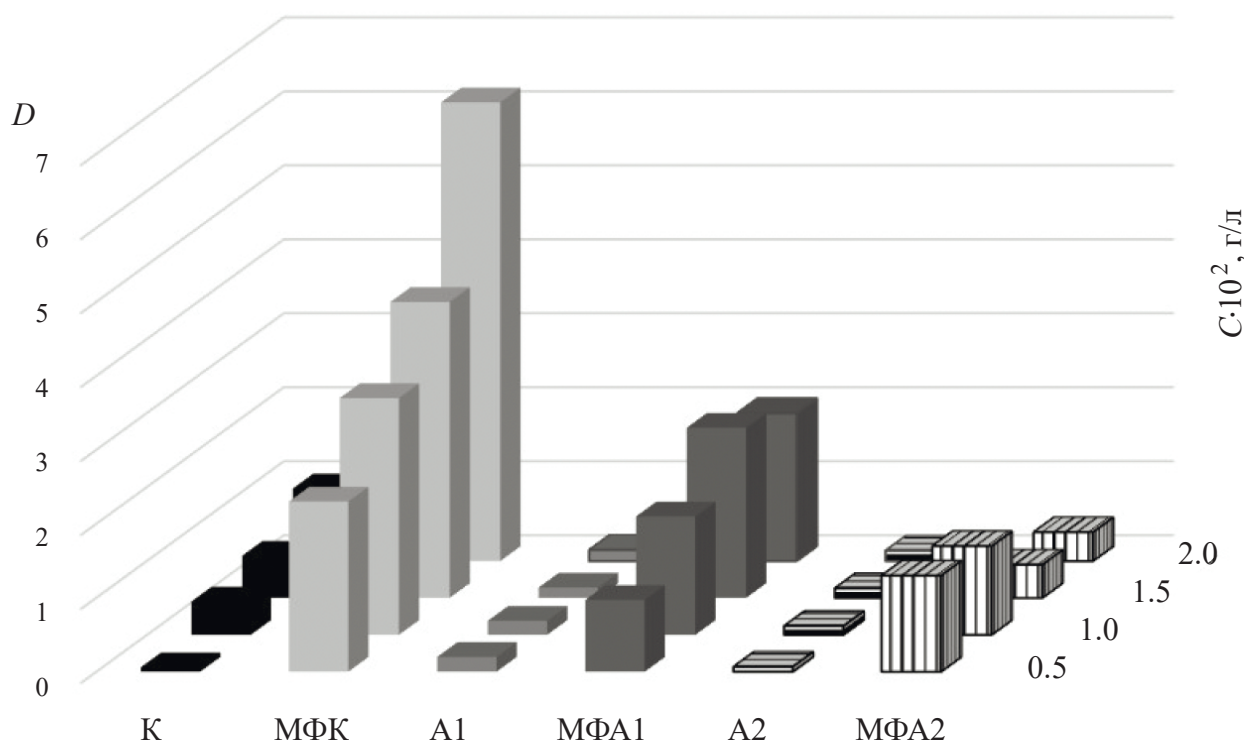
**Таблица 2.** Флокулирующий эффект  $D$  при трех соотношениях биополимер и магнетит в процессе седиментации суспензии голубой глины при  $C_{ДФ} = 0.8\%$

МФ	Соотношения биополимер и магнетит	$D$
К : МНЧ	5 : 1	6.0
	10 : 1	2.0
	20 : 1	0.3
А1 : МНЧ	5 : 1	1.8
	10 : 1	0.7
	20 : 1	-0.28
А2 : МНЧ	5 : 1	0.5
	10 : 1	0.1
	20 : 1	-0.86

вдоль линии магнитного поля, что способствует эффективному флокулообразованию в суспензии глины (рис. 3). Для объяснения различия в значениях параметра  $D$  у анализируемых МФ необходимо учитывать специфические особенности поверхности раздела фаз, а также знак и величину электрокинетического потенциала, протяженность двойного электрического слоя.

Также можно предположить образование химических связей между положительно заряженной протонированной аминогруппой  $-\text{NH}_3^+$  хитозана и анионными фрагментами на поверхности частиц голубой глины.

Для цитрусового и яблочного пектина и МФ на их основе реализуется мостичный механизм флокуляции. Мостичный механизм флокуляции, предложенный Ла Мером, в качестве движущей силы процесса флокуляции рассматривает образование полимерных мостиков между дисперсными частицами и макромолекулами адсорбированного полимера и объясняет основные закономерности флокуляции суспензий заряженными полимерами: образование с участием полимеров объемных и рыхлых осадков, рост флокулирующих показателей полимеров с ростом молекулярной массы адсорбата, зависимость эффективности флокуляции



**Рис. 3.** Концентрационная зависимость флокулирующего эффекта индивидуальных полимеров и МФ на их основе при  $\text{pH} = 8$

от технологических факторов (скорость перемешивания суспензии, порядок ввода активных добавок, рабочий объем и форма реактора флокуляции). На основании установленных в настоящей работе результатов по флокулирующему эффекту для МФ на основе цитрусового и яблочного пектина в соответствии с литературными данными [42, 43] имеет место мостичный механизм флокуляции. Подтверждением увеличения скорости седиментации частиц глины с ростом концентрации вводимой добавки магнитных наноконпозитов служат результаты табл. 3, а именно возрастание числа макромолекул магнитных флокулянтов, приходящихся на число частиц голубой глины в объеме суспензии. Расчеты проведены для концентрации частиц ДФ  $C_{ДФ} = 0.8\%$ .

Отметим, что среди параметров дисперсионной среды достаточно эффективным является значение рН среды, влияющего на агрегативную и на седиментационную устойчивость частиц ДФ. Эти процессы сказываются на изменении соотношения и концентрации сильно полярных гидратированных ионов  $H^+$  и  $HO^-$  в пределах протяженности двойного электрического слоя. Повышенная способность к флокуляции при варьировании рН может быть обусловлена увеличением концентрации ионов  $OH^-$  и концентрации ионов  $H^+$ . Изменение флокулирующего эффекта при варьировании рН среды в диапазоне от 2 до 11 при концентрации магнитных флокулянтов  $C = 2.0 \cdot 10^{-2}$  г/л показано на рис. 4.

В области  $pH > 8$  для анализируемых МФ при концентрации  $C = 2.0 \cdot 10^{-2}$  г/л зафиксирован наибольший рост значений флокулирующего эффекта, обусловленный наличием не только локализованной адсорбцией полимера на частицах голубой глины, но и нелокализованной адсорбции биополимеров, входящих в состав МФ. В сильнощелочной области рН ( $pH = 11$ ) значения флокулирующего эффекта  $D$  с участием образца МФК в 3 раза выше по сравнению с образцом МФА1 и в 12 раз выше, чем у МФА2. Появление различий в значениях параметра  $D$  при варьировании рН среды (рис. 4) обусловлено не только изменением строения двойного электрического слоя вокруг частиц голубой глины, но и изменением характера адсорбции

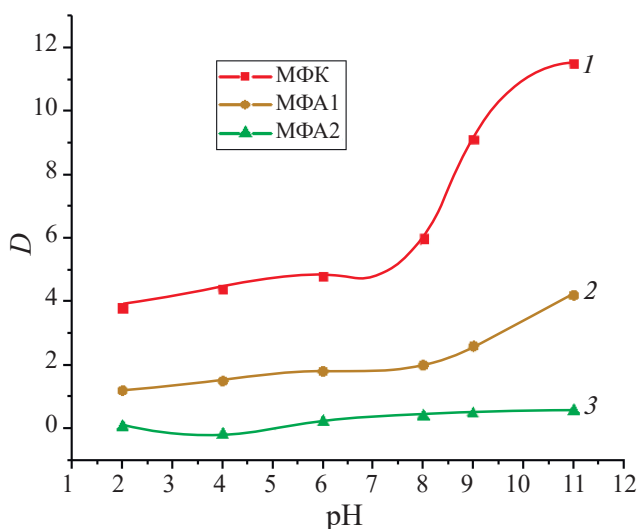


Рис. 4. Зависимость флокулирующего эффекта  $D$  МФК (1), МФА1 (2), МФА2 (3) от рН среды при концентрации МФ  $C = 2.0 \cdot 10^{-2}$  г/л

макромолекул магнитных флокулянтов на частицах ДФ – макромолекулы адсорбируются либо на одной частице дисперсной фазы, либо на уже образовавшихся флокулах [44]. Голубая глина заряжена отрицательно при тестируемых значениях рН в диапазоне от 2 до 11. Для системы «осадок + МФК» в сильно и слабокислых средах МФК заряжен положительно и придает поверхности частиц ГГ небольшой положительный заряд. В сильнощелочной среде аминогруппы хитозана в составе МФК не протонируются, остаются нейтральными, поэтому отрицательный заряд поверхности частиц ГГ обусловлен зарядом магнетита ( $\zeta = -45.4$  мВ).

Методом динамического светорассеяния был установлен характер изменения электрокинетического потенциала частиц голубой глины и магнитных флокулянтов МФК, МФА1, МФА2 при варьировании рН среды (рис. 5). Голубая глина представляет собой природный алюмосиликатный материал, богатый микроэлементами. Ее цвет обусловлен наличием металлов в составе,

Таблица 3. Соотношение количества макромолекул магнитных флокулянтов и частиц голубой глины при различных концентрациях МФК, МФА1 и МФА2 при рН = 7.4

Параметр	$C \cdot 10^2$ , г/л	МФК	МФА1	МФА2
Число макромолекул $N_M \times 10^{-15}$	0.5	2.78	9.13	7.5
	1.0	5.57	18.3	15.0
	1.5	8.35	27.4	22.5
	2.0	11.1	36.5	30
$(N_M/N_G) \times 10^{-3}$	5	14.1	46.1	37.8
	10	28.1	92.4	75.8
	15	42.2	138	113
	20	56.1	184	151
$N_G \times 10^{-10}$		19.8		

таких как железо, медь и др. [45]. На основных гранях минерала локализован постоянный отрицательный заряд, на боковых гранях минерала при  $\text{pH} < 6.5$  может возникнуть переменный положительный заряд в результате реакции протонирования групп  $\text{Si-OH}$  и  $\text{Al-OH}$ . Для магнитного флокулянта МФК изоэлектрическая точка установлена при  $\text{pH} = 9.3$ .

Механизм флокуляции во многом определяется величиной заряда частиц суспензии и заряженных макромолекул МФ. Эффективная флокуляция образцом МФК наблюдается в области  $\text{pH}$ , близких к изоэлектрической точке. Дестабилизация суспензии голубой глины в этом случае происходит по нейтрализационному механизму, т.е. за счет компенсации заряда при адсорбции на частицах ДФ противоположно заряженных макроионов. Во всех остальных случаях флокуляция происходит за счет адсорбции с образованием макромолекулярных мостиков [43, 45].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы магнитные флокулянты на основе наночастиц магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и природных полисахаридов (хитозан, цитрусовый и яблочный пектин). Определена концентрационная область, в которой добавки магнитных наноконкомпозитов различной природы работают с функцией флокулянта. По результатам комплексных исследований установлено, что, варьируя концентрацию магнитных флокулянтов и величину  $\text{pH}$  среды, можно изменять флокулирующие параметры системы. Среди исследуемых магнитных флокулянтов

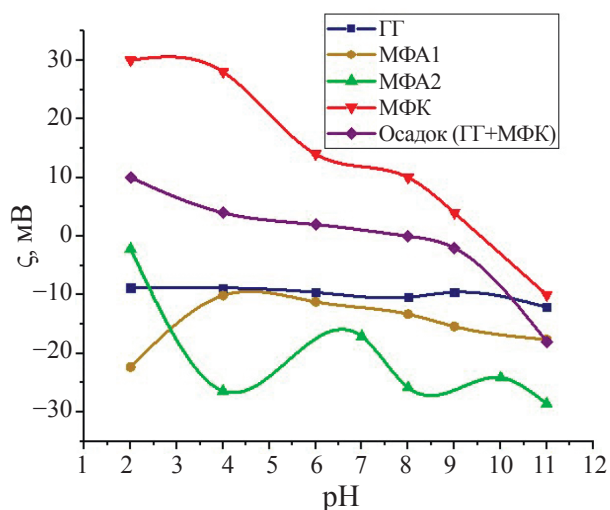


Рис. 5. Зависимость дзета-потенциала голубой глины и магнитных флокулянтов (МФК, МФА1, МФА2) от  $\text{pH}$  среды

наибольшим флокулирующим эффектом обладает образец МФК при концентрации  $2 \cdot 10^{-2}$  г/л. Отмечено усиление эффективности флокулообразования в суспензии голубой глины с участием МФК в сильнощелочной области  $\text{pH}$ . Выявленные закономерности и эффекты процесса флокуляции в режиме свободного (нестесненного) оседания могут быть применены для направленного регулирования устойчивости суспензий с участием магнитных наноконкомпозитов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Montiel Schneider M.G., Martin M.J., Otarola J., et al., Biomedical applications of iron oxide nanoparticles: current insights progress and perspectives // *Pharmaceutics*. 2022. V. 14. № 1. P. 204. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14010204>
2. Kurczewska J., Dobosz B. Recent progress and challenges regarding magnetite-based nanoparticles for targeted // *Drug Delivery Appl. Sci.* 2024. V. 14. № 3. 1132. <https://doi.org/10.3390/app14031132>
3. Zhou Q., Yu Z., Ma Y. Review on the application of magnetic flocculation technology in water treatment // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2019. V. 295. № 4. P. 042107. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/4/042107>
4. Mishra B., Kallem P., Yadavalli R., et al. Industrial wastewater treatment using extracellular polymer substances/ bioflocculants: A review // *Applied Water Science*. 2025. V. 15. P. 46–50. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02401-9>
5. Курмангажи Г., Тажисбаева С.М., Мусабеков К.Б., Левин И.С., Кузин М.С., Ермакова Л.Э., Ю В.К. Получение дисперсных композиций магнетит-бентонит и адсорбция на них казкаина // *Коллоидный журнал*. 2021. Т. 83. № 3. С. 320–329. <https://doi.org/10.31857/S0023291221030095>
6. Leshuk T., Holmes A.B., Ranatunga D., et al. Magnetic flocculation for nanoparticle separation and catalyst recycling // *Environmental Science: Nano*. 2018. V. 5. № 2. P. 509–519. <https://doi.org/10.1039/C7EN00827A>
7. Rahim S., Iftikhar F.J., Malik M.I. Biomedical applications of magnetic nanoparticles // *Metal Nanoparticles for Drug Delivery and Diagnostic Applications*. 2020. P. 301–328. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816960-5.00016-1>

8. Tang C., He Z., Liu H., et al. Application of magnetic nanoparticles in nucleic acid detection // Journal of nanobiotechnology. 2020. V. 18. P. 62.  
<https://doi.org/10.1186/s12951-020-00613-6>
9. Slimani Y., Hannachi E., Tombuloglu H., et al. Magnetic nanoparticles based nanocontainers for biomedical application // Smart Nanocontainers. 2020. С. 229–250.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816770-0.00014-9>
10. Zhao Y., Liang W., Liu L., et al. Harvesting *Chlorella vulgaris* by magnetic flocculation using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> coating with polyaluminium chloride and polyacrylamide // Biores. Technol. 2015. V. 198. P. 789–796.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.087>
11. Sun Y., Yu Y., Zhou S., et al. Functionalized chitosan-magnetic flocculants for heavy metal and dye removal modeled by an artificial neural network // Separ. and Purif. Technol. 2022. V. 282. P. 120002.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120002>
12. Xiao X., Yu Y., Sun Y., et al. Heavy metal removal from aqueous solutions by chitosan-based magnetic composite flocculants // Journal of Environmental Sciences. 2021. V. 108. P. 22–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.02.014>
13. Yu. X.L., Tong S.R., Ge M.F., et al. One-step synthesis of magnetic composites of cellulose iron oxide nanoparticles for arsenic removal // J. Mater. Chem. 2013. V. 1. № 3. P. 959–965.  
<https://doi.org/10.1039/C2TA00315E>
14. Wu P., Yi J., Feng L., et al. Microwave assisted preparation and characterization of a chitosan-based flocculant for the application and evaluation of sludge flocculation and dewatering // International Journal of Biological Macromolecules. 2020. V. 155. № 7. P. 708–720.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.011>
15. Muzher M.I., Hadeel A.I. Treatment of Al दौरa oil refinery wastewater turbidity using magnetic flocculation // Tikrit Journal of Engineering Sciences. 2019. V. 26. № 1. P. 1–8.  
<https://doi.org/10.25130/tjes.26.1.01r>
16. García-García G., Caro C., Fernández-Álvarez F., et al. Multi-stimuli-responsive chitosan-functionalized magnetite/poly(ε-caprolactone) nanoparticles as theranostic platforms for combined tumor magnetic resonance imaging and chemotherapy // Nanomedicine. 2023. V. 52. P. 102695.  
<https://doi.org/10.1016/j.nano.2023.102695>
17. S A Lemos T., F de Souza J., R Fajardo A. Magnetic microspheres based on pectin coated by chitosan towards smart drug release // Carbohydr Polym. 2021. V. 265. P. 118013.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118013>
18. Gu N., Wang C., Zhang J., et al. Synthesis and characterization of magnetic poly (acrylamide-co-maleic anhydride) grafted gelatin as a novel heavy metal ions wastewater treatment agent // Desalination and Water Treatment. 2018. V. 116. P. 170–178.  
<https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22525>
19. Ghibardo F., Gerbino E., Copello G.J., et al. Pectin-decorated magnetite nanoparticles as both iron delivery systems and protective matrices for probiotic bacteria // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2019. V. 180. P. 193–201.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.04.049>
20. Джардималиева Г.И., Иржак В.И., Братская С.Ю., Майоров В.Ю., Привар Ю.О., Касымова Э.Д., Кыдралиева К.А. Стабилизация наночастиц магнетита в среде гуминовых кислот и исследование их сорбционных свойств // Коллоидный журнал. 2020. Т. 82. № 1. С. 11–17.  
<https://doi.org/10.31857/s0023291220010036>
21. Ma J., Fu X., Jiang L., et al. Magnetic flocculants synthesized by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> coated with cationic polyacrylamide for high turbid water flocculation // Environmental Science and Pollution Research. 2018. V. 25. № 26. P. 25955–25966.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-2610-1>
22. Li S.N., Li B., Yu Z. R., et al. Chitosan *in-situ* grafted magnetite nanoparticles toward mechanically robust and electrically conductive ionic-covalent nanocomposite hydrogels with sensitive strain-responsive resistance // Composites Science and Technology. 2020. V. 195. P. 108173.  
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108173>
23. Zhihao H., Kun W., Zihan W., et al. Research progress of magnetic flocculation in water treatment // Journal of magnetochemistry. 2024. V. 10. № 8. P. 56.  
<https://doi.org/10.3390/magnetochemistry10080056>

24. Wang T., Yang W.L., Hong Y., et al. Magnetic nanoparticles grafted with amino-riched dendrimer as magnetic flocculant for efficient harvesting of oleaginous microalgae // *Chemical Engineering Journal*. 2016. V. 297. P. 304–314.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.038>
25. Yu W., Wang C., Wang G., et al. Flocculation Performance and Kinetics of Magnetic Polyacrylamide Microsphere under Different Magnetic Field Strengths // *Journal of Chemistry*. 2020. Article ID 1579424.  
<https://doi.org/10.1155/2020/1579424>
26. Проскурина В.Е., Галяметдинов Ю.Г. Синтез и флокулирующие свойства магнитоуправляемых наноконпозитов // *Высокомолекулярные соединения. Серия С*. 2024. Т. 66. № 1. С. 125–133.  
<https://doi.org/10.31857/S2308114724010113>
27. Wang S., Zhang C., Chang Q. Synthesis of magnetic crosslinked starch-graft-poly (acrylamide)-co-sodium xanthate and its application in removing heavy metal ions // *Journal of Experimental Nanoscience*. 2017. V. 12. № 1. P. 270–284.  
<https://doi.org/10.1080/17458080.2017.1321793>
28. El-kharrag R., Abdel Halim S.S., Amin A., et al. Synthesis and characterization of chitosan-coated magnetite nanoparticles using a modified wet method for drug delivery applications // *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. 2019. V. 68. № 1–3. P. 73–82.  
<https://doi.org/10.1080/00914037.2018.1525725>
29. Nasser A., Qdemat A. Unterweger H., et al. Impact of coating type on structure and magnetic properties of biocompatible iron oxide nanoparticles: insights into cluster organization and oxidation stability // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2024. V. 26. № 38. P. 24912–24923.  
<https://doi.org/10.1039/D4CP01735H>
30. Гервальд А.Ю., Прокопов Н.И., Ширякина Ю.М. Синтез суперпарамагнитных наночастиц магнетита // *Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова*. 2010. Т. 5. № 3. С. 45–49.
31. Freis B., De Los Angeles Ramirez M., Kiefer C., et al. Effect of the size and shape of dendronized iron oxide nanoparticles bearing a targeting ligand on MRI, magnetic hyperthermia and photothermia properties – from suspension to *in vitro* studies // *Pharmaceutics*. 2023. V. 15. № 4. P. 1104–1133.  
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15041104>
32. Белоусов П.Е., Крупская В.В. Бентонитовые глины России и стран ближнего зарубежья // *Георесурсы*. 2019. Т. 21. № 3. С. 79–90.  
<https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.79-90>
33. Проскурина В.Е., Кашина Е.С., Рахматуллина А.П. Седиментация суспензии диоксида титана магнитными флокулянтами // *Коллоидный журнал*. 2023. Т. 85. № 1. С. 77–84.  
<https://doi.org/10.31857/S0023291222600420>
34. Kumirska J., Czerwicka M., Kaczyński Z., Bychowska A., et al. Application of spectroscopic methods for structural analysis of chitin and chitosan // *Mar. Drug*. 2010. V. 8. № 5. P. 1567–1636  
<https://doi.org/10.3390/md8051567>
35. Никифоров А.И., Лазарева Е.О., Едемская Е.В., Семенов В.Г., Гареев К.Г., Королев Д.В. Микрофлюидный синтез наночастиц магнетита и его сравнение с синтезом в объемном реакторе // *Коллоидный журнал*. 2024. Т. 86. № 4. С. 469–481.  
<https://doi.org/10.31857/S0023291224040062>
36. Simon G.H., Bauer J., Saborovski O., et al. T1 and T2 relaxivity of intracellular and extracellular USPIO at 1.5T and 3T clinical MR scanning // *European radiology*. 2006. V. 16. № 3. P. 738–745.  
<https://doi.org/10.1007/s00330-005-0031-2>
37. Wu L., Yang C., Lv Z., et al. Facile one-pot synthesis of different surfactant-functionalized water-soluble Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles as magnetic resonance imaging contrast agents for melanoma tumors // *RSC Advances*. 2015. V. 5. № 62. P. 50557–50564.  
<https://doi.org/10.1039/C4RA05786D>
38. Saraswathy A., Nazeer S.S., Jeevan M., et al. Citrate coated iron oxide nanoparticles with enhanced relaxivity for *in vivo* magnetic resonance imaging of liver fibrosis // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2014. V. 117. P. 216–224.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.02.034>

39. *Srivastava S., Awasthi R., Gajbhiye N.S., et al.* Innovative synthesis of citrate-coated superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and its preliminary application // *Journal of colloid and interface science*. 2011. V. 359. № 1. P. 104–111.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.03.059>
40. *Leong S.S., Ahmad Z., Low S.C., et al.* Unified View of Magnetic Nanoparticle Separation under Magnetophoresis // *Langmuir*. 2020. V. 36. № 28. P. 8033–8055.  
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00839>
41. *Pusta A., Tertis M., Crăciunescu I., et al.* Recent advances in the development of drug delivery applications of magnetic nanomaterials // *Pharmaceutics*. 2023. V. 15. № 7. P. 1872.  
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15071872>
42. *Мягченков В.А., Проскурина В.Е.* Сополимеры акриламида с функцией флокулянтов: монография. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та. 2011. 290 с.
43. *Hogg R.* Bridging flocculation by polymers // *KONA Powder and Particle Journal*. 2013. V. 30. P. 3–14.  
<https://doi.org/10.14356/kona.2013005>
44. *Niculescu A.G., Chircov C., Grumezescu A.M.* Magnetite nanoparticles: Synthesis methods – A comparative review // *Methods*. 2021. V. 199. P. 16–27.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2021.04.018>
45. *Разговоров П.Б., Нагорнов Р.С., Разговорова М.П.* Использование голубой глины для выделения примесных веществ из льняного масла // *Известия Вузов. Химия и химическая технология*. 2014. Т. 57. № 12. С. 72–75.

ПРИЛОЖЕНИЕ

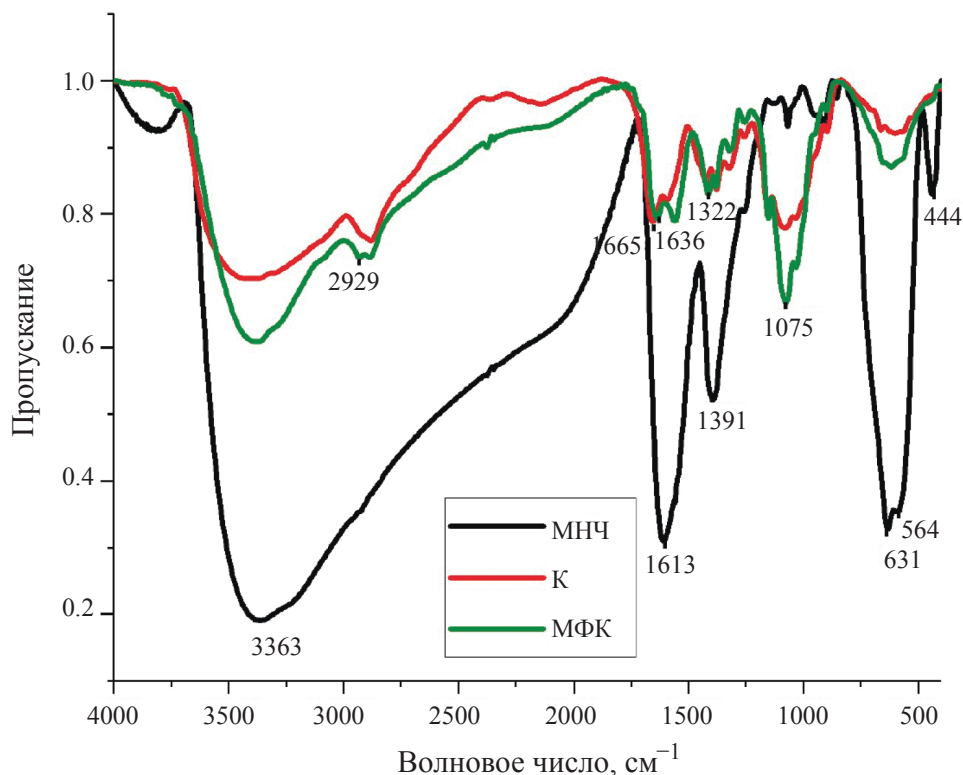


Рис. П1. ИК-спектр магнетита (МНЧ), хитозана (К) и магнитного флокулянта на основе магнетита и хитозана (МФК)

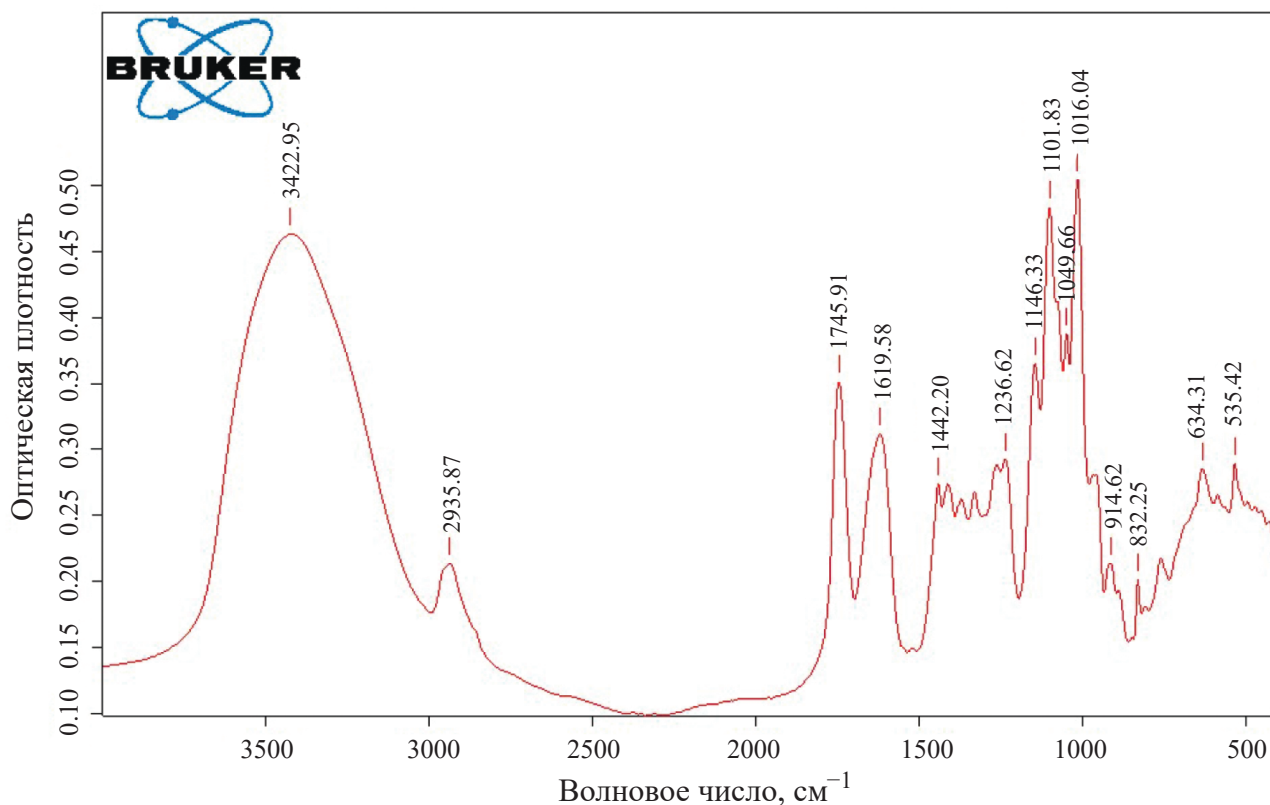


Рис. П2. ИК-спектр цитрусового пектина (А1)