

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 666.322.4+661.872.2

СИНТЕЗ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И БИОЛОГИЧЕСКАЯ
АКТИВНОСТЬ КОМПОЗИТА БЕНТОНИТ-ОКСИД ЖЕЛЕЗА

© 2023 г. О. В. Алексеева^а, *, Д. Н. Смирнова^а, А. В. Носков^а,
О. Ю. Кузнецов^б, М. А. Кириленко^б, А. В. Агафонов^а

^аИнститут химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, ул. Академическая, 1, Иваново, 153045 Россия

^бИвановская государственная медицинская академия, Шереметевский пр-т, 8, Иваново, 153012 Россия

*e-mail: ova@isc-ras.ru

Поступила в редакцию 21.02.2023 г.

После доработки 23.03.2023 г.

Принята к публикации 03.04.2023 г.

Методом химического соосаждения синтезирован композиционный порошкообразный материал бентонит-оксид железа. Исследованы гранулометрический состав, морфология, кристаллическая структура, пористость и термическая устойчивость полученного порошка. Установлено, что оксид железа в составе композита представляет собой твердый раствор маггемит-магнетит с химической формулой $Fe_{2,95}O_4$. Выявлено увеличение жизнеспособности бактерий *Escherichia coli* M-17 при культивировании в питательной среде в присутствии синтезированного порошка бентонит-оксид железа.

Ключевые слова: маггемит, магнетит, кристаллическая структура, биологическая активность, *Escherichia coli*

DOI: 10.31857/S0044457X23600299, EDN: MLILYG

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы отмечается постоянно растущий интерес исследователей к проблеме создания многофункциональных наноструктурированных материалов различного назначения, содержащих оксиды железа, для применения в биотехнологии, медицине и экологии в качестве сорбентов, катализаторов, носителей лекарственных средств. Решение задач для биомедицины накладывает дополнительные требования на материалы и приводит к необходимости поиска нетоксичных, экологически безопасных и биосовместимых соединений, содержащих магнитные наночастицы.

Среди магнитных материалов широкое применение в биомедицинских приложениях и нанотехнологии нашли наночастицы оксидов железа (магнетит Fe_3O_4 , маггемит $\gamma-Fe_2O_3$), обладающие рядом преимуществ, таких как высокая удельная площадь поверхности, нетоксичность, биосовместимость, каталитическая активность [1, 2].

Существуют различные методы получения наночастиц магнетита: химическое соосаждение [3], гидротермальный синтез [4], золь-гель метод [5, 6], термическое разложение [7], микроволновой метод [8] и другие. Наиболее распространенным из этих методов является химическое осаждение из водных растворов солей железа. При этом варьирование условий синтеза позволяет получать на-

ночастицы с регулируемой морфологией. Однако в процессе синтеза магнетит может окисляться до маггемита [1], что не позволяет точно прогнозировать состав образующихся продуктов без проведения дополнительных исследований.

Кроме того, синтезированные наночастицы нестабильны на воздухе и легко агломерируются, что приводит к снижению магнитных свойств магнетита. Для их стабилизации в процессе синтеза могут быть использованы полимеры и неорганические соединения, в частности, диоксид кремния и глинистые минералы [9–11]. Интерес к использованию алюмосиликатов в качестве матриц для магнетита обусловлен их слоистой структурой и специфическими свойствами, такими как большая площадь поверхности, высокая катионно-обменная способность, наличие активных центров различной природы, микро- и нанопористая структура, механическая и термическая стабильность [12]. Среди природных алюмосиликатов особое место занимают бентонитовые глины, которые являются дешевыми и экологически чистыми материалами [13].

В литературе последних лет в основном представлены работы, посвященные применению композитов на основе магнетизированной глины в качестве сорбентов ионов тяжелых металлов и органических соединений [14–16], магнитореологических жидкостей [17] и катализаторов [18]. Особый

интерес вызывает использование материалов на основе композитов глина-магнетит в биологии и медицине. В частности, авторы работы [19] рассматривают магнитные нанокompозиты на основе цеолита в качестве перспективных материалов для разработки на их основе систем адресной доставки лекарственных препаратов. Возможность применения нанокompозита магнетит-монтмориллонит в качестве перорального контрастного вещества для МРТ желудочно-кишечного тракта показана в статье [20].

В настоящей работе получены композиты бентонит-оксид железа и исследована их структура, морфология, текстурные свойства и термическая устойчивость. Впервые изучено влияние синтезированных композитов на жизнеспособность грамотрицательных бактерий *Escherichia coli* M-17.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования использовали бентонит (Sigma-Aldrich, США). Композит был получен методом химического соосаждения солей железа в порах бентонита. Для синтеза композита глину (6.002 г) в условиях интенсивного перемешивания при воздействии ультразвука диспергировали в водном растворе (100 мл), содержащем 1.004 г гексагидрата хлорида железа $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и 0.5 г тетрагидрата хлорида железа $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Для осаждения частиц оксида железа добавляли по каплям водный раствор аммиака. Затем частицы магнетизированного бентонита отделяли внешним полем, трижды промывали дистиллированной водой до нейтрального значения pH и высушивали в вакууме при 70°C до сухого остатка. Полученный композит бентонит-оксид железа представлял собой порошок коричневого цвета.

Порошок оксида железа (магнетит-маггемит) синтезировали также методом соосаждения, но без глинистого минерала.

Размеры частиц исходного бентонита и магнетизированного материала определяли методом лазерной дифракции на анализаторе размера частиц Analysette 22 Compact (Германия). Результаты представлены в виде кривых дифференциального и интегрального (кумулятивного) распределения.

ζ -Потенциал исследуемых порошков определяли методом лазерной дифракции на анализаторе размера частиц и ζ -потенциала Zetasizer Nano (Malvern Instruments Ltd, Великобритания).

Морфологию и элементный состав бентонита и композита исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Quattro S (Thermo Fisher Scientific, Чехия).

Удельную поверхность бентонита и композита бентонит-оксид железа определяли методом низкотемпературной (77 K) адсорбции и десорбции паров азота на газовом сорбционном анализаторе

Nova 1200e (Quantachrome, США). Площадь поверхности, общий объем пор и распределение пор по размерам определяли с использованием моделей Брунауэра-Эммета-Теллера и Барретта-Джойнера-Халенды [21].

Кристаллическую структуру порошков бентонита, оксида железа и композита бентонит-оксид железа исследовали методом дифракции рентгеновских лучей в диапазоне углов $2\theta = 5^\circ - 70^\circ$ на дифрактометре D2 Phaser (излучение $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 0.154$ нм, Германия). Средний размер кристаллитов определяли методом Шеррера, межслоевое расстояние рассчитывали по формуле Брэгга [22].

ИК-спектры пропускания для образцов алюмосиликатов в виде таблеток с KBr регистрировали на спектрометре Avatar 360 FTIR ESR с Фурье-преобразованием (Thermo Nicolet, США) в диапазоне волновых чисел 4000–500 cm^{-1} .

Термический анализ бентонита и композита бентонит-оксид железа выполняли на приборе синхронного термического анализа Netzsch STA449 F3 (Германия), сопряженного с масс-спектрометром.

Антибактериальную активность исходного и модифицированного порошков глины изучали по отношению к грамотрицательным бактериям *Escherichia coli* M-17. Предварительно культуру *E. coli* M-17 культивировали на скошенном мясопептонном агаре в течение суток. Затем для посевов в питательную среду готовили исходное разведение культуры из расчета 10^3 кл/мл. Образцы исходного и модифицированного бентонита вносили (0.05 г) в мясопептонный бульон объемом 5 мл и подвергали стерилизации кипячением в течение 30 мин. После остывания среды в данные пробирки с бентонитом и контрольную пробирку добавляли по 0.1 мл тестируемой культуры *E. coli* вышеуказанного разведения. Затем все пробирки встряхивали в течение 1–2 мин и помещали на инкубацию при 37°C на сутки.

На следующий день все пробирки встряхивали на шейкере в течение 5 мин и после осаждения порошков выполняли десятикратное разведение материала из контрольной и опытных серий пробирок на физиологическом растворе до конечной степени разведения 10^{14} . Затем были выполнены посевы по 0.1 мл на поверхность агаризованной питательной среды Эндо в чашках Петри, которые были помещены в термостат на сутки при температуре 37°C для роста тестируемой бактериальной культуры. Жизнеспособность бактерий в присутствии порошков бентонита и бентонит-оксид железа оценивали путем подсчета колониеобразующих единиц.

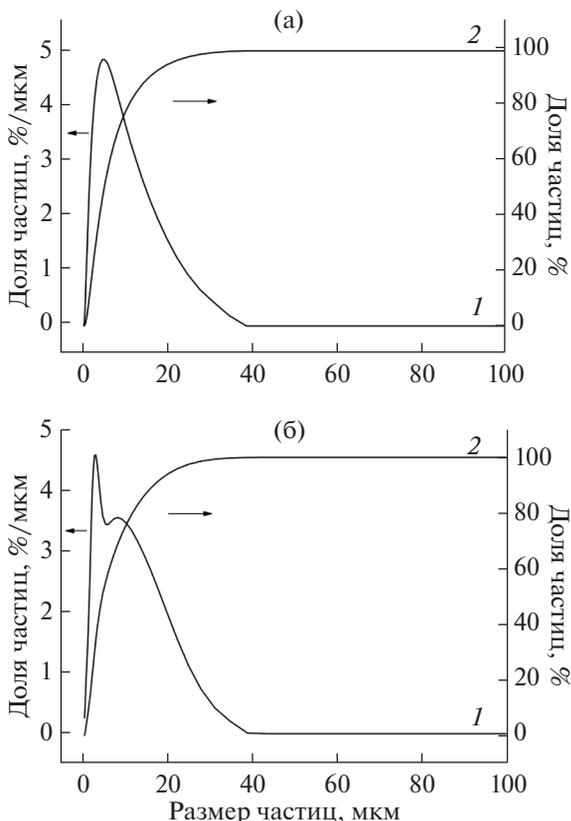


Рис. 1. Распределение частиц бентонита (а) и магнетизированного бентонита (б) по размерам: 1 – кривые дифференциального распределения; 2 – кривые интегрального распределения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Распределение частиц бентонита и магнетизированной глины по размерам приведено на рис. 1а и 1б соответственно. Как видно из интегральных кривых, бентонит и композит содержат микрочастицы с размерами от 1 до 40 мкм. Гранулометрический анализ показал, что полученные дифференциальные распределения имеют мономодальный характер с максимумами при 5 мкм (для бентонита) и 3 мкм (для композита).

Для количественной оценки взаимодействия синтезированных нанопорошков с бактериальными клетками были проведены измерения ζ -потенциала. Согласно полученным данным, для поверхности бентонита эта величина равна -36 мВ, что обусловлено наличием на поверхности глины $-OSiO_2$ -групп. В случае композита ζ -потенциал меньше (по абсолютной величине) и составляет -16.05 мВ. Можно предположить, что это уменьшение связано с интеркаляцией ионов железа, так как для синтезированного магнетита-маггемита $\zeta = -4.24$ мВ. Отметим, что полученные результаты близки к приведенным в [13].

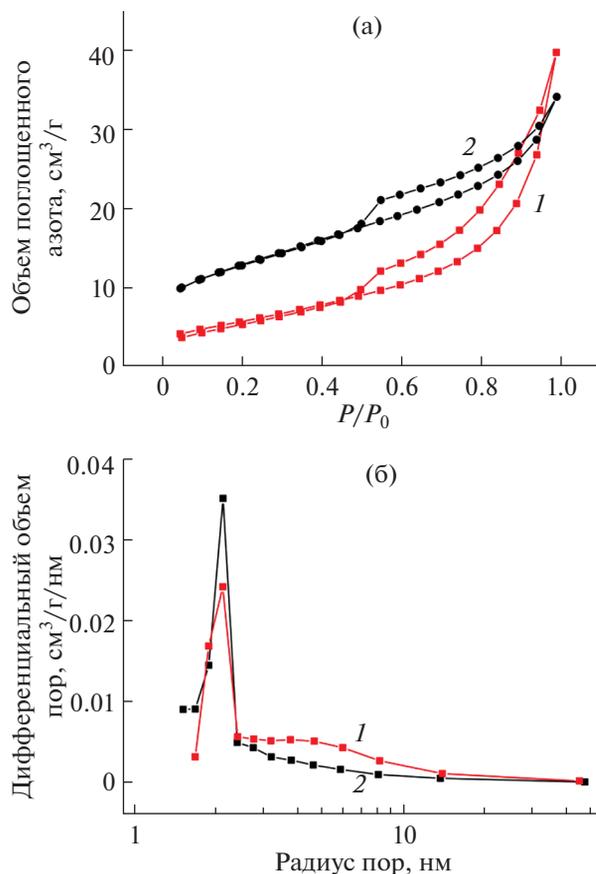


Рис. 2. Изотермы низкотемпературной адсорбции–десорбции паров азота (а) и дифференциальные кривые распределения объема пор по размерам (б) для образцов бентонита (1) и бентонита-оксида железа (2).

Текстурные характеристики бентонита и магнетизированной глины получены на основе исследований адсорбции-десорбции паров азота при 77 К (рис. 2). Приведенные изотермы (рис. 2а) характеризуются наличием гистерезиса и могут быть отнесены к IV типу по классификации IUPAC [23]. Форма петли гистерезиса для бентонита относится к типу H2, что характерно для глинистых материалов с мезопористой структурой [24]. При модификации бентонита частицами магнетита-маггемита форма петли практически не изменяется (или незначительно сужается). Резкий подъем адсорбционных кривых при высоком относительном давлении (P/P_0) связан с капиллярной конденсацией в порах материала.

Кривые распределения пор по размерам для изученных материалов имеют мономодальный характер (рис. 2б).

Количественный анализ полученных данных показал, что модификация алюмосиликата оксидом железа приводит к снижению площади удельной поверхности от 25.392 до 23.659 м²/г и суммарного объема пор от 0.061 до 0.041 см³/г. Полученные

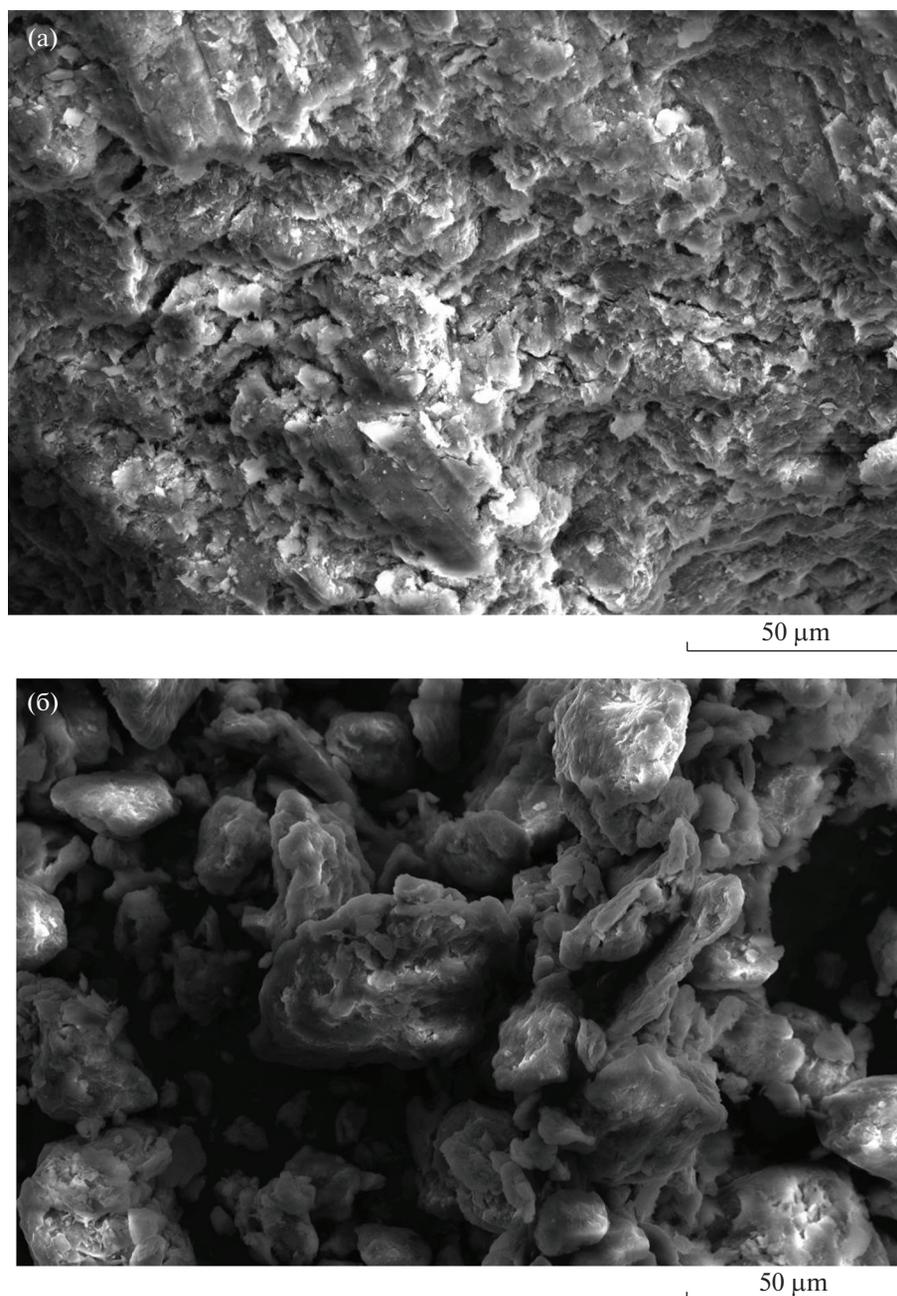


Рис. 3. Электронные микрофотографии бентонита (а) и композита бентонит-оксид железа (б).

данные позволяют предположить, что в процессе синтеза композита поры заполняются наночастицами оксида железа.

На рис. 3 приведены электронные изображения поверхности бентонита и магнетизированной глины, полученные с помощью сканирующей электронной спектроскопии. Из рис. За видно, что исходный бентонит имеет типичную слоистую структуру. Полученный образец композита состоит из агрегатов частиц алюмосиликата различной морфологии с включениями оксида железа (рис. 3б).

По результатам энергодисперсионного анализа определено содержание химических элементов в бентоните и композите (табл. 1). Исследованные порошки содержат элементы кремнекислородного и алюмокислородного каркаса (O, Si, Al). Кроме того, на рассмотренном участке магнетизированной глины обнаружено Fe в количестве 26.4%.

Кристаллическая структура исследованных материалов была изучена методом дифракции рентгеновских лучей. На рис. 4 приведены дифрактограммы порошка бентонита, а также син-

тезированных оксида железа и композита бентонит-оксид железа. Дифрактограмма бентонита (рис. 4, кривая 1) свидетельствует о наличии двух кристаллических структур, соответствующих монтмориллонитовой глине (JCPDS № 13-0135) в качестве основной фазы и гексагональному кварцу (JCPDS № 05-0490) в качестве второстепенной фазы [25]. Наиболее выраженный рефлекс при $2\theta = 7.14^\circ$ соответствует базальному расстоянию $d_{001} = 1.24$ нм. Рефлексы при $2\theta = 11.84^\circ, 19.80^\circ, 26.80^\circ, 61.91^\circ$ связаны с кристаллографическими плоскостями (002), (110), (112), (330) и согласуются с данными [13].

Рентгенограмма оксида железа (рис. 4, кривая 2) содержит пики при $2\theta = 30.26^\circ, 35.62^\circ, 43.27^\circ, 57.25^\circ$ и 62.73° , соответствующие плоскостям (220), (311), (400), (511) и (440). По мнению авторов работы [1], порошок оксида железа, синтезированный методом соосаждения, представляет собой твердый раствор смешанного состава, монофазные магнетит (Fe_3O_4) и маггемит ($\gamma-Fe_2O_3$) в процессе синтеза не образуются.

Известно, что магнетит имеет гранцентрированную кубическую кристаллическую решетку, основанную на 32 ионах кислорода, с включением 16 трехвалентных ионов железа в тетраэдрических и октаэдрических порах (положения А и В соответственно) и восьми двухвалентных ионов железа в положениях В [26]. Маггемит, как и магнетит, имеет обратную шпинельную кристаллическую структуру с той лишь разницей, что в ней отсутствуют двухвалентные ионы железа, что компенсируется наличием вакансий в В-местах. Поэтому химическую формулу стехиометрического маггемита можно представить как $Fe_{2.667}O_4$, а формулу твердого раствора – как $Fe_{3-\delta}O_4$, где величина $3 - \delta$ характеризует дефектность исследуемого оксида железа [27].

В настоящем исследовании для оценки дефектности синтезированных материалов был использован подход, развитый в упомянутых работах [1, 27], согласно которому дефектность может быть оценена по размеру элементарной ячейки кристаллической решетки, установленному из данных рентгеновской дифракции. В этих работах проанализированы литературные данные для твердых растворов смешанного состава маггемит-магнетит и получена эмпирическая связь размера элементарной ячейки и дефектности в виде:

$$y = 0.0053x + 0.8341. \quad (1)$$

В этом соотношении $y = a$, нм – длина ребра элементарной ячейки, рассчитанная по межплоскостному расстоянию d_{hkl} по формуле:

$$a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}. \quad (2)$$

Переменная x в формуле (1) определяется средней стехиометрией $\langle 3 - \delta \rangle$ материала:

Таблица 1. Данные энергодисперсионного анализа для бентонита и композита бентонит-оксид железа

Элемент	Содержание, ат. %	
	бентонита	бентонита-оксида железа
O	60.81	27.82
Al	16.92	17.82
Si	22.27	21.65
Fe	–	26.40
Cl	–	5.08
Mg	–	1.23

$$x = 3(\langle 3 - \delta \rangle) - 8. \quad (3)$$

Согласно [27], соотношение (3) наглядно характеризует состав твердого раствора маггемит-магнетит, а именно: при $x = 0$ величина средней стехиометрии $\langle 3 - \delta \rangle$ будет равна 2.667, что соответствует чистому маггемиту, при $x = 1$, величина $\langle 3 - \delta \rangle = 3$, что соответствует чистому магнетиту.

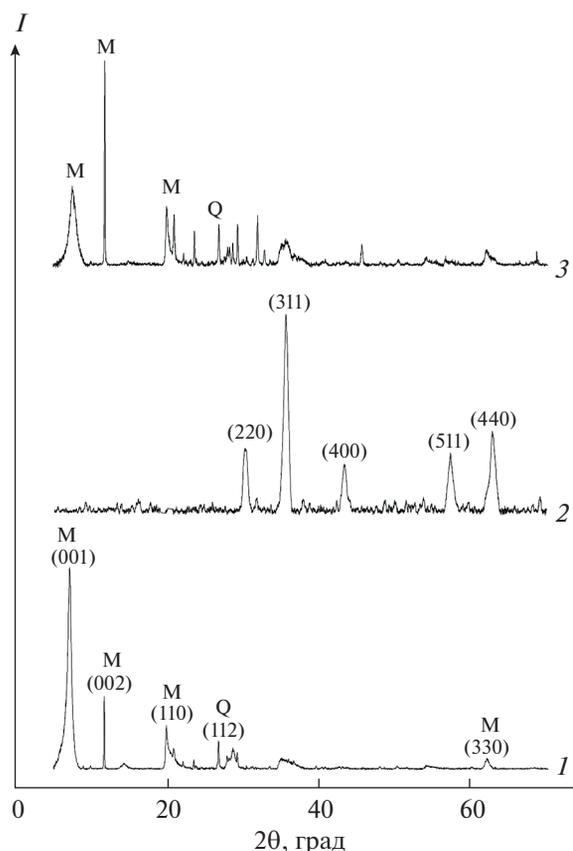


Рис. 4. Дифрактограммы образцов: 1 – бентонит; 2 – оксид железа; 3 – бентонит-оксид железа. Рефлексы, соответствующие фазам монтмориллонита и кварца, отмечены символами М и Q.

Таблица 2. Результаты оценки дефектности синтезированных материалов оксид железа и бентонит-оксид железа

Параметр	Оксид железа	Бентонит-оксид железа
a_{av} , нм	0.8360	0.8386*
x	0.358	0.849
$\langle 3 - \delta \rangle$	2.786	2.950

* При расчете не учитывали рефлекс при $2\theta \sim 62^\circ$ из-за перекрытия пиков (440) оксида железа и (330) бентонита.

Как показывают результаты использования этого подхода, в случае синтезированного в настоящей работе оксида железа длина ребра элементарной ячейки, рассчитанная по формуле (2) для всех перечисленных выше рефлексов, составляет 0.8360 ± 0.0011 нм. Таким образом, с учетом среднего значения ($a_{av} = 0.8360$ нм) можно заключить, что полученный материал представляет собой твердый раствор маггемит-магнетит с химической формулой $Fe_{2.786}O_4$ (табл. 2).

Необходимо отметить, что на дифрактограмме синтезированного оксида железа отсутствуют рефлексы в области углов (2θ), меньших 20° . Это позволяет регистрировать структурные изменения в глинистом материале при введении наполнителя. Как видно из рис. 4 (кривая 3), дифрактограмма композита содержит все дифракционные пики как оксида железа, так и бентонита. Однако наблюдается незначительное уменьшение межплоскостного расстояния d_{001} (от 1.26 до 1.17 нм). Кроме того, увеличиваются размеры кристаллитов (от 9.21 до 13.0 нм), что указывает на встраивание наночастиц оксида железа в матрицу бентонита.

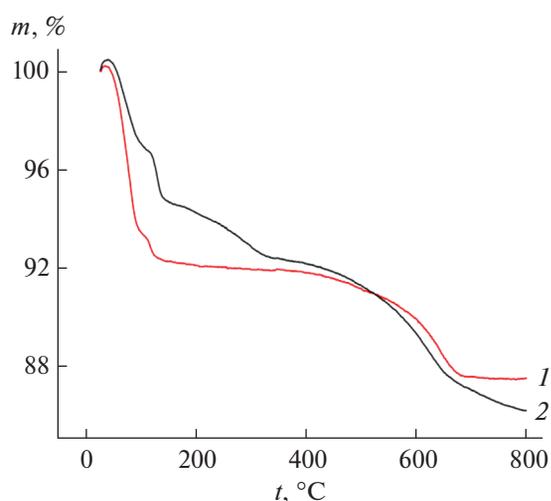


Рис. 5. Термогравиметрические кривые: 1 — бентонит; 2 — бентонит-оксид железа.

Можно предположить, что структура наночастиц маггемит-магнетит при интеркаляции в матрицу глинистого материала будет изменяться. Для проверки этого предположения был использован вышеописанный метод и рассчитана длина ребра элементарной ячейки оксида железа в составе композита, которая оказалась равной 0.8386 ± 0.0010 нм. Результаты оценки дефектности приведены в табл. 2. Видно, что оксид железа в составе композита с бентонитом характеризуется меньшей дефектностью по сравнению с синтезированным $Fe_{2.786}O_4$. Это свидетельствует в пользу предположения, что бентонит тормозит окисление ионов Fe^{2+} в магнетите и тем самым формирование структуры, дефицитной по Fe^{2+} .

Результаты термогравиметрического анализа бентонита и синтезированного композита бентонит-оксид железа приведены на рис. 5. Представленные данные говорят о содержании во всех образцах значительного количества влаги. Из рисунка видно, что начальный этап потери веса имеет большую интенсивность в случае немодифицированной глины. При нагревании образца бентонита до $150^\circ C$ его масса снижается на 8%.

Вторая стадия термического разложения ($400\text{--}700^\circ C$), по-видимому, связана с дегидроксилированием структурных силанольных и алюмоильных групп бентонита. Она протекает с одинаковой интенсивностью для глинистого минерала и композита. Снижение массы образца бентонита на этой стадии (6%) хорошо согласуется с результатами исследований термического поведения монтмориллонита (основного компонента бентонита) [28].

Кроме того, для образца композита при температурах $150\text{--}350^\circ C$ наблюдается снижение веса на ~2%, связанное с дегидроксилированием оксида железа, присутствующего в композите.

На рис. 6 приведены ИК-спектры бентонита и композита бентонит-оксид железа. В ИК-спектре бентонита (спектр 1) видны характерные полосы поглощения алюмосиликата. В области $3700\text{--}3400\text{ см}^{-1}$ расположены полосы валентных колебаний ОН-групп, связанные с октаэдрическими катионами глинистого минерала. Полоса при 1635 см^{-1} относится к деформационным колебаниям адсорбированных молекул H_2O . Валентным колебаниям связей Si—O—Si соответствует полоса с максимумом при 1040 см^{-1} . Полосы при 802 и 464 см^{-1} отвечают деформационным колебаниям групп Si—O—Si из тетраэдров SiO_4 . Полоса поглощения при 524 см^{-1} обусловлена деформационными колебаниями групп Al—O—Si [29].

В ИК-спектре композита, в отличие от спектра алюмосиликата (рис. 6, спектр 2), наблюдается изменение контура широкой полосы в области $3600\text{--}3000\text{ см}^{-1}$, снижение интенсивности и гипсохромный сдвиг на 6 см^{-1} максимума полосы при

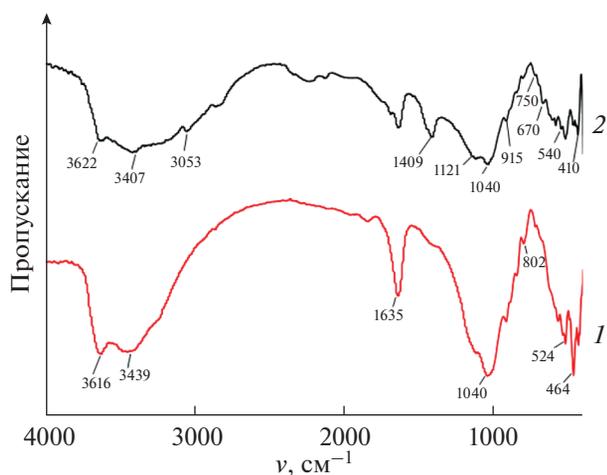


Рис. 6. ИК-спектры: 1 – бентонит, 2 – бентонит-оксид железа.

3616 cm^{-1} и снижение интенсивности полосы в области 1550–750 cm^{-1} с максимумом при 1040 cm^{-1} . Наличие оксидов железа в композите проявляется полосами в интервале 670–410 cm^{-1} . Характерный пик оксида железа ~520 cm^{-1} [29] перекрывается с деформационными колебаниями групп Al–O–Si (524 cm^{-1}). Такие изменения в спектре модифицированной глины можно объяснить образованием водородных связей между кислородсодержащими группами оксида железа и силанольными группами бентонита Si–OH.

Для изучения биологической активности исследуемых материалов по отношению к живым системам в работе проведена оценка жизнеспособности грамотрицательных бактерий *E. coli* M-17 в присутствии бентонита и синтезированного композита бентонит-оксид железа. Микробиологические исследования по определению численности микроорганизмов проводили с использованием метода предельных разведений. В качестве контрольных были выбраны результаты, полученные при культивировании бактерий в питательной среде Эндо без исследуемых порошков.

Визуальный анализ фотографий чашек Петри (рис. 7) свидетельствует о влиянии состава порошка на рост и развитие микроорганизмов. Кроме того, подсчитанное количество живых клеток *E. coli* M-17 в зависимости от состава приведено в табл. 3.

Как видно, культивирование в присутствии бентонита приводит к снижению жизнеспособности бактерий *E. coli* по сравнению с контролем. Одной из причин данного явления, на наш взгляд, является близость значений ζ -потенциала. Для бентонита, как указано выше, $\zeta = -36.0$ мВ, тогда как для клеток *E. coli* M-17 в зависимости от метода определения найдены значения ζ -потенциала в интервале от -30.4 до -42.0 мВ [30]. В

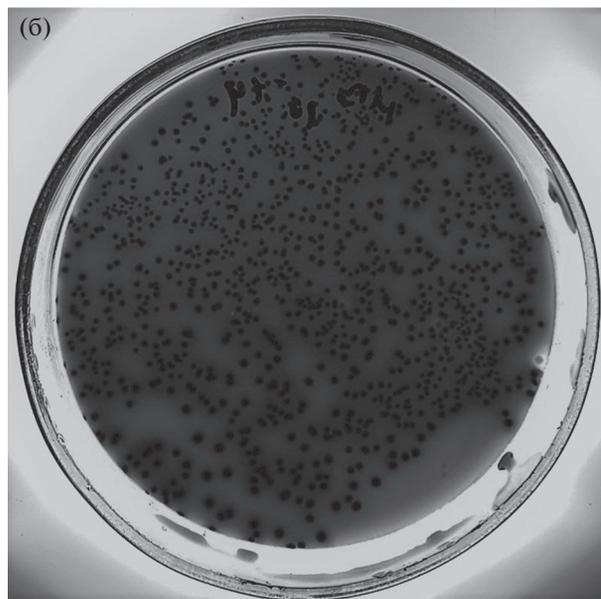
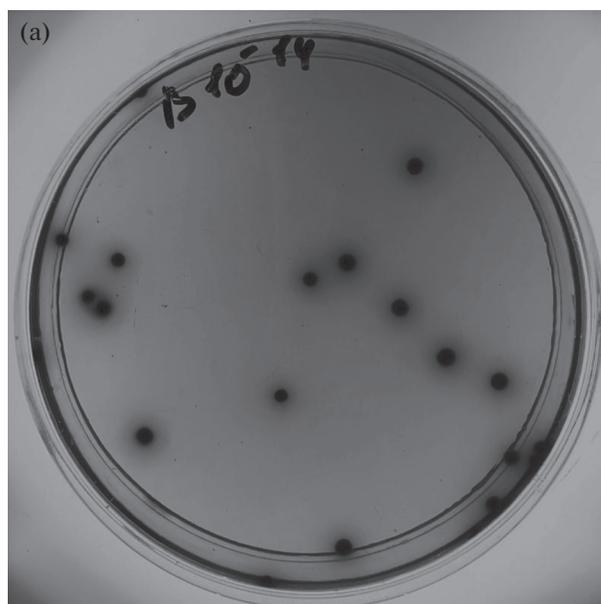


Рис. 7. Оценка жизнеспособности *Escherichia coli* под воздействием бентонита (а) и композита бентонит-оксид железа (б). Высев на среду Эндо из разведения 10^{14} .

этих условиях частицы бентонита взаимодействуют с бактериальными клетками, иммобилизируя их между собой и формируя плотный слой осадка. Это хорошо видно при анализе рис. 7а. Иммобилизация клеток в матрице бентонита среди практически одинаково заряженных частиц ведет к уменьшению поступления питательных компонентов среды к клеткам и нарушению процесса размножения микроорганизмов, уменьшая в итоге количество жизнеспособных *E. coli* M-17.

Таблица 3. Влияние исследуемых материалов на жизнеспособность бактерий *Escherichia coli* М-17

Образец	Количество живых клеток <i>E. coli</i> М-17 на среде Эндо, КОЕ/мл
Контроль	54×10^{14}
Культивирование с бентонитом	28.5×10^{14}
Культивирование с композитом	904×10^{14}

При добавлении в питательную среду порошка бентонит-оксид железа наблюдается увеличение количества жизнеспособных клеток *E. coli* М-17 по сравнению с порошком немодифицированного бентонита и контрольным тестом (табл. 3). По-видимому, благодаря более высокому значению ζ -потенциала частиц композита (-16.05 мВ) увеличивается вероятность их взаимодействия с клетками *E. coli* М-17. Это приводит к формированию развитой каркасной структуры из частиц композита бентонит-оксид железа с большим количеством клеток бактерий на поверхности. Кроме того, присутствие магнитных частиц может способствовать формированию клетками *E. coli* М-17 биопленок, защищающих бактерии от воздействия внешних физико-химических факторов [31, 32].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирован композиционный порошкообразный материал бентонит-оксид железа и исследованы его физико-химические свойства. Установлено, что при модификации бентонита частицами, соответствующими составу твердого раствора магнетит-маггемитового ряда, наблюдаются изменения в гранулометрическом составе, морфологии поверхности, кристаллической структуре, пористости, ИК-спектрах, термическом поведении, а именно – выявлено уменьшение площади удельной поверхности и суммарного объема пор. Сделан вывод об образовании водородных связей между кислородсодержащими группами оксида железа и силанольными группами бентонита. Результаты проведенных микробиологических тестов продемонстрировали значительное увеличение жизнеспособности грамотрицательных бактерий *E. coli* М-17 при культивировании в присутствии композита бентонит-оксид железа. Полученные данные можно использовать в различных биотехнологических приложениях для адресной магнитоуправляемой доставки лекарств, а также для разработки пробиотических препаратов, содержащих живые бактерии и повышающих их жизнеспособность.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования физико-химических свойств бентонита и композита были выполнены на оборудовании центра коллективного пользования “Верхне-волжский региональный центр физико-химических исследований”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания № 122040500044-4.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шилова О.А., Николаева А.М., Коваленко А.С. и др. // Журн. неорган. химии. 2020. Т. 65. № 3. С. 398. <https://doi.org/10.31857/S0044457X20030137>
2. Алексеева О.В., Носков А.В., Гусейнов С.С., Агафонов А.В. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2022. Т. 58. № 4. С. 393. <https://doi.org/10.31857/S0044185622040052>
3. Rahmawati R., Taufiq A., Sunaryono S. et al. // J. Mater. Environ. Sci. 2018. V. 9. P. 155. <https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.19>
4. Stoia M., Pacurariu C., Istrate R. et al. // J. Therm. Anal. Calorim. 2015. V. 121. P. 989. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4641-x>
5. Hu P., Chang T., Chen W.-J. et al. // J. Alloys Compd. 2019. V. 773. P. 605. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.238>
6. Папынов Е.К., Номеровский А.Д., Азон А.С. и др. // Журн. неорган. химии. 2020. Т. 65. № 11. С. 1449. <https://doi.org/10.31857/S0044457X2011015X>
7. Avasthi A., Caro C., Pozo-Torres E. et al. // Top. Curr. Chem. 2020. V. 378. P. 40. <https://doi.org/10.1007/s41061-020-00302-w>
8. Williams M.J., Sanchez E.S., Aluri E.R. et al. // RSC Adv. 2016. V. 6. № 87. P. 83520. <https://doi.org/10.1039/C6RA11819D>
9. Liu W., Chang Z., Yao P. et al. // Glass Phys. Chem. 2021. V. 47. № 6. P. 590. <https://doi.org/10.1134/S1087659621060183>
10. Orolínová Z., Mockovciaková A. // Mater. Chem. Phys. 2009. V. 114. P. 956. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.11.014>
11. Chang J., Ma J., Ma Q. et al. // Appl. Clay. Sci. 2016. V. 119. P. 132. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.038>
12. Awad A.M., Shaikh S.M.R., Jalab R. et al. // Sep. Purif. Technol. 2019. V. 228. P. 115719. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115719>
13. Zhang H., Liang X., Yang C. et al. // J. Alloys Compd. 2016. V. 688. P. 1019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.036>

14. *Mirbagheri N.S., Sabbaghi S.* // *Micropor. Mesopor. Mater.* 2018. V. 259. P. 134.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.10.007>
15. *Yan L., Li S., Yu H. et al.* // *Powder Technol.* 2016. V. 301. P. 632.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.051>
16. *Курмангажи Г., Тажибаева С.М., Мусабеков К.Б. и др.* // *Коллоидный журнал.* 2021. Т. 83. № 3. С. 320.
<https://doi.org/10.31857/S0023291221030095>
17. *Chen L., Zhou C.H., Fiore S. et al.* // *Appl. Clay Sci.* 2016. V. 127–128. P. 143.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.009>
18. *Tireli A.A., Guimarães I.R., Terra J.C. et al.* // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. V. 22. P. 870.
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-2973-x>
19. *Голубева О.Ю., Бразовская Е.Ю., Аликина Ю.А. и др.* // *Физика и химия стекла.* 2019. Т. 45. № 1. С. 74.
<https://doi.org/10.1134/S0132665119010037>
20. *Bartonkova H., Mashlan M., Medrik I. et al.* // *Chem. Pap.* 2007. V. 61. № 5. P. 413.
<https://doi.org/10.2478/s11696-007-0057-9>
24. *Грег С., Синг К.* Адсорбция, удельная поверхность, пористость / Пер. с англ. под ред. Карнаухова А.П. М.: Мир, 1984.
22. *Alekseeva O.V., Rodionova A.N., Bagrovskaya N.A. et al.* // *Iran Polym. J.* 2019. V. 28. P. 123.
<https://doi.org/10.1007/s13726-018-0683-9>
23. *Sing K.S.W.* // *Pure Appl. Chem.* 1985. V. 57. № 4. P. 603.
<https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
24. *Carrado K.A., Csencsits R., Thiyagarajan P. et al.* // *J. Mater. Chem.* 2002. V. 12. P. 3228.
<https://doi.org/10.1039/B204180B>
25. *Sanaad M.M.S., Farahat M.M., Abdel Khalek M.A.* // *Adv. Powder. Technol.* 2021. V. 32. Is. 5. P. 1573.
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.03.013>
26. *Алексеев В.П., Рыбникова Е.В., Шипилин М.А.* // *Вестн. ЯргУ. Сер. Естеств. и техн. науки.* 2012. № 4. С. 10.
27. *Cervellino A., Frison R., Cernuto G. et al.* // *J. Appl. Crystallogr.* 2014. V. 47. P. 1755.
<https://doi.org/10.1107/S1600576714019840>
28. *Shen W., He H., Zhu J. et al.* // *J. Colloid Interface Sci.* 2007. V. 313. P. 268.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.04.029>
29. *Ziabari S.A.M., Babamoradi M., Hajizadeh Z. et al.* // *Phys. B: Condens. Matter.* 2020. V. 588. P. 412167.
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412167>
30. *Gogry F.A., Siddiqui M.T., Sultan I. et al.* // *Pharmaceutics.* 2022. V. 14. P. 295.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14020295>
31. *Летута У.Г., Тихонова Т.А.* // *Докл. АН.* 2019. Т. 484. № 6. С. 768.
32. *Raouia H., Hamida B., Khadidja A. et al.* // *Arch. Microbiol.* 2020. V. 202. P. 77.
<https://doi.org/10.1007/s00203-019-01719-8>