

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ

УДК 628.1: 546.723

СОРБЦИЯ ИОНОВ НИКЕЛЯ НА ГИДРОКСИДЕ ЖЕЛЕЗА(III), СВЕЖЕОСАЖДЕННОМ ИЗ РАСТВОРА СУЛЬФАТА ЖЕЛЕЗА(II). ЧАСТЬ 2. СТРУКТУРА И СОСТАВ ОСАДКОВ ГИДРОКСИДА ЖЕЛЕЗА(III)

©2024 г. О. Д. Линников^{1,*}, И. В. Родина¹, Г. С. Захарова¹, И. В. Бакланова¹,
Ю. В. Кузнецова¹, А. П. Тютюнник¹, З. А. Фаттахова¹, Л. Ю. Будлакова¹

¹ФГБУН Институт химии твердого тела УрО РАН (ИХТТ УрО РАН),
ул. Первомайская, 91, Екатеринбург, 620990 Россия

*e-mail: linnikov@mail.ru

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

После доработки 03.09.2023 г.

Принята к публикации 22.04.2024 г.

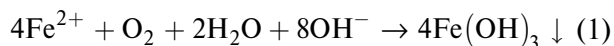
Проведен сравнительный анализ состава и структуры свежесаживаемых осадков гидроксида железа(III), полученных из раствора сульфата железа(II) в присутствии сульфата натрия (400 мг/л) при pH 7 и 8 до и после сорбции на них ионов никеля. Методами ИК- и КР-спектроскопии, рентгенофазового и термогравиметрического анализов показано, что осадки имеют брутто-формулу $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ и содержат небольшое количество гетита ($\alpha\text{-FeOOH}$) и лепидокрокита ($\gamma\text{-FeOOH}$). Установлено, что сорбция ионов никеля на этих осадках не сопровождается хемосорбцией, т.е. образованием смешанных соединений между железом и никелем. Дзета-потенциал частиц осадков при $\text{pH} < 6$ имеет положительное значение, а при $\text{pH} > 6$ становится отрицательным. Точка нулевого заряда частиц осадков соответствует $\text{pH} = 6$.

Ключевые слова: гидроксид железа(III), сульфат железа(II), никель, ИК-, КР- спектроскопия, рентгенофазовый и термогравиметрический методы анализа, дзета-потенциал

DOI: 10.31857/S0044185624010031, EDN: OPFBUG

ВВЕДЕНИЕ

В первой части данной работы было показано, что гидроксид железа(III), осаживаемый из раствора сульфата железа(II) в присутствии сульфата натрия (400 мг/л) при pH 7 и 8, обладает высокой сорбционной емкостью в отношении ионов двухвалентного никеля [1]. Однако структура и состав образовавшегося осадка не были детально изучены. Поэтому осталось неясным, какое соединение железа(III) являлось в данном случае сорбентом, т.к. осаждение гидроксида железа(III) из растворов солей двухвалентного железа протекает за счет окисления последнего кислородом воздуха, присутствующим в растворенном виде в растворе, и при небольших концентрациях ионов железа(II) может быть описано обобщающим уравнением реакции:



Однако, по имеющимся данным, образующийся при этом осадок гидроксида железа(III)

не всегда соответствует брутто-формуле $\text{Fe}(\text{OH})_3$ [2–6]. Например, ранее проведенные исследования свежесаживаемых осадков гидроксида железа(III), полученных при осаждении из раствора хлорида железа(III) в присутствии сульфата натрия (400 мг/л) при pH 7 и 8, показали, что они представляют собой двухлинейчатый ферригидрит и имеют брутто-формулу $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$ [7]. При этом эти осадки тоже имеют высокую сорбционную емкость по отношению к ионам никеля [8].

Сравнение сорбционных свойств свежесаживаемых осадков гидроксида железа(III), полученных из растворов хлорида железа(III) и сульфата железа(II), свидетельствует о том, что наиболее глубокое удаление ионов никеля достигается при использовании осадков гидроксида железа(III), осаживаемых из раствора FeCl_3 [1]. Цель работы – прояснить, чем обусловлены эти различия: разной удельной поверхностью осадков или отличиями в их структуре и составе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Как и ранее [1], исследования проводили в лабораторных условиях при температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$ на модельном растворе, содержащем 400 мг/л сульфата натрия. Осадки гидроксида железа(III) для изучения их физико-химических свойств осаждали из модельного раствора гидроксидом натрия (10 г/л) при pH 7 или 8 при начальной концентрации ионов железа(II) в растворе 100 мг/л. Для этого в заданный объем модельного раствора при непрерывном перемешивании магнитной мешалкой (650 об/мин), добавляли расчетное количество концентрированного раствора FeSO_4 (13.57 г/л). После ввода щелочи раствор с образующимся в нем осадком гидроксида железа(III) перемешивали при pH 7 или 8 в течение 60 мин. Затем полученную суспензию фильтровали под вакуумом через стеклянный фильтр марки ПОР 4 (Россия), промывали на фильтре дистиллированной водой и сушили на воздухе при комнатной температуре.

Осадки гидроксида железа(III) после сорбции ионов никеля были получены в сорбционных экспериментах, методика которых была описана ранее [1]. В этих опытах в модельном растворе вначале осаждали гидроксид железа(III), а затем в образовавшуюся суспензию вводили ионы никеля (10 мг/л) в виде раствора сульфата никеля.

Величину pH во всех опытах контролировали с помощью pH-метра “АНИОН 4100”. При этом электроды pH-метра были постоянно погружены в модельный раствор в течение всего эксперимента.

Определение общего содержания углерода в осадках гидроксида железа(III) проводили на экспресс-анализаторе “Метавак-CS-30”. Для этого навеску анализируемого вещества массой 0.02–0.03 г вносили в предварительно прокаленную фарфоровую лодочку. Лодочку помещали в трубчатую печь, где производили сжигание образца в токе кислорода при температуре 1150–1200°C. Количество образовавшегося диоксида углерода определяли путем измерения поглощенного им инфракрасного излучения.

Морфологию частиц осадков гидроксида железа(III) изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM 6309 LA фирмы JEOL (Japan) со встроенным энергодисперсионным рентгеновским анализатором EX-23010BU.

Дзета-потенциал частиц осадка гидроксида железа(III) определяли методом электро-

форетического рассеяния света на приборе ZetasizerNano ZS (Malvern Panalytical Ltd.). Для этого в заданный объем модельного раствора при непрерывном его перемешивании на магнитной мешалке вводили требуемое количество раствора FeSO_4 (13.57 г/л). После этого раствор начинали медленно подщелачивать раствором NaOH (10 г/л). После каждого подщелачивания и установления равновесия в растворе из него отбирали пробы, в которых измеряли дзета-потенциал частиц образовавшегося осадка гидроксида железа(III). Начальная концентрация ионов железа(II) в растворе составляла 12.5 мг/л.

ИК-спектр поглощения осадков гидроксида железа(III) в диапазоне волновых чисел 4000–400 cm^{-1} регистрировали на ИК-Фурье спектрометре Vertex 80 (Брукер) с помощью приставки НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения) MVP-Pro (Harrick) (материал призм — алмаз). КР-спектры снимали в диапазоне волновых чисел 4000–50 cm^{-1} при комнатной температуре на рамановском дисперсионном спектрометре InVia Reflex RENISHAW (длина волны $\lambda = 532$ нм, мощность лазера $P = 1\text{--}5$ мВт).

Термогравиметрический анализ осадков гидроксида железа(III) был выполнен на термоанализаторе STA 449 F₃ Jupiter (Netzsch), совмещенном с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403 в атмосфере воздуха при скорости нагрева 10°/мин (ТГ-ДСК-МС).

Рентгенофазовый анализ осадков производили на рентгеновском дифрактометре STADI-P (STOE, Germany).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

СЭМ-изображение одного из полученных осадков гидроксида железа(III) представлено на рис. 1. Видно, что осадок состоит из очень маленьких агрегированных частиц. Внешне он практически неотличим от аналогичного осадка, полученного осаждением при pH 7 из раствора хлорида железа(III) [7]. Все остальные осадки гидроксида железа(III), осажденные из раствора сульфата железа(II), имели аналогичный вид. Это были рыхлые гидратированные образования темно-коричневого цвета. После сушки на воздухе при комнатной температуре происходило уплотнение осадков, они в несколько раз уменьшались в объеме и становились достаточно твердыми. Для их измельчения необходимо было приложить значительные усилия.

Типичные дифрактограммы осадков гидроксида железа(III) приведены на рис. 2, из которо-

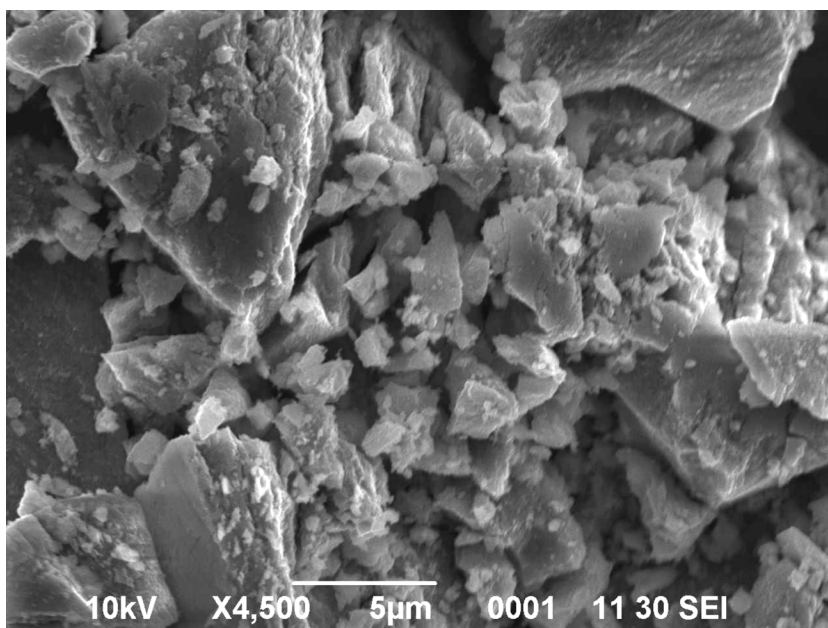


Рис. 1. Микрофотография осадка гидроксида железа(III), осажденного из модельного раствора при pH 7.

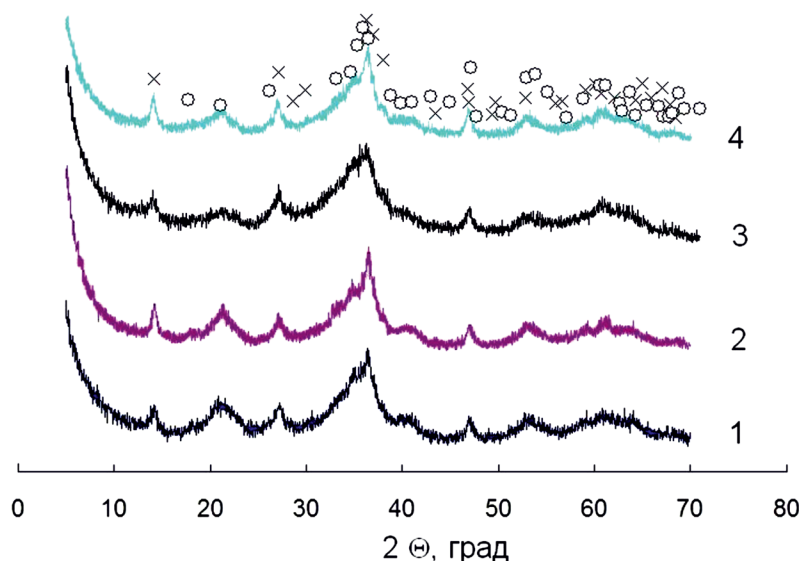


Рис. 2. Дифрактограммы осадков гидроксида железа(III) после сушки на воздухе при комнатной температуре ($25 \pm 2^\circ\text{C}$): 1 и 2 осаждение при pH 7 и 8 соответственно; 3 и 4 – осаждение при pH 7 и 8 с последующей сорбцией ионов никеля на образовавшихся осадках; o – гетит ($\alpha\text{-FeOOH}$); x – лепидокрокит ($\gamma\text{-FeOOH}$).

го видно, что они практически совпадают между собой, независимо от условий их получения. Сорбция ионов никеля на этих осадках не оказывает влияния на вид соответствующих дифрактограмм (кривые 1 и 3, а также 2 и 4 соответственно).

Расшифровка дифрактограмм показала, что осадки представляют собой смесь двух фаз:

гетита ($\alpha\text{-FeOOH}$) и лепидокрокита ($\gamma\text{-FeOOH}$) (рис. 2). Причем соотношение между фазами меняется с ростом pH раствора и не зависит от присутствия в нем ионов никеля. Так, если при pH 7 содержание гетита в осадке составляет 61–68 масс%, а лепидокрокита – 32–39 масс%, то при pH 8 содержание гетита возрастает до 77–81 масс%, а лепидокрокита, соответственно,

падает до 19–23 масс%. Размытый вид пиков на дифрактограммах указывает на нанометровый размер частиц осадков и их слабую окристаллизованность.

КР-спектры одного из полученных осадков гидроксида железа(III), снятые при разной мощности облучающего лазера, приведены на рис. 3.

Видно, что с увеличением мощности лазера (Р) наблюдается изменение вида получаемого КР-спектра. Если при $P = 1$ мВт спектр представляет собой кривую, на которой не фиксируется ни одной линии (рис. 3, кривая 1), то при мощности лазера 5 мВт (рис. 3, кривая 2) вид спектра меняется, в нем появляются линии, соответствующие гематиту (α - Fe_2O_3): 211 см^{-1} (A_g), 272 , 379 и 616 см^{-1} (E_g), $\sim 1300\text{ см}^{-1}$ (вторая гармоника). Это свидетельствует о деструкции осадка при данной мощности облучающего лазера. Наблюдаемый при этом подъем фона связан, скорее всего, с колебаниями CO_3^{2-} и их обертонами. Отметим, что термогравиметрический анализ (см. ниже) также показал наличие в составе осадков небольших количеств карбонатов.

Обнаруженное разложение осадка гидроксида железа(III) с ростом мощности облучающего лазера хорошо согласуется с данными [7, 9, 10], где при съемке КР-спектров была зафиксирована аналогичная деструкция ферригидрита [7, 9], а также трансформация магнетита в маггемит и гематит [10].

Таким образом, съемка КР-спектра при малой мощности лазера (1 мВт) не зафиксировала линии, характерные для ОН-групп, которые должны входить в состав осадка, если он соответствует брутто-формуле FeOОН (или Fe(ОН)_3). Кроме того, на спектре отсутствуют также линии, характерные для гётита (α - FeOОН) и лепидокрокита (γ - FeOОН) [9–11], что указывает на отсутствие этих фаз в осадке. Этот результат не согласуется с данными рентгенофазового анализа (см. выше).

ИК-спектры полученных осадков гидроксида железа(III) показаны на рис. 4, из которого видно, что они сходны между собой.

На всех ИК-спектрах осадков гидроксида железа(III) в области частот валентных колебаний

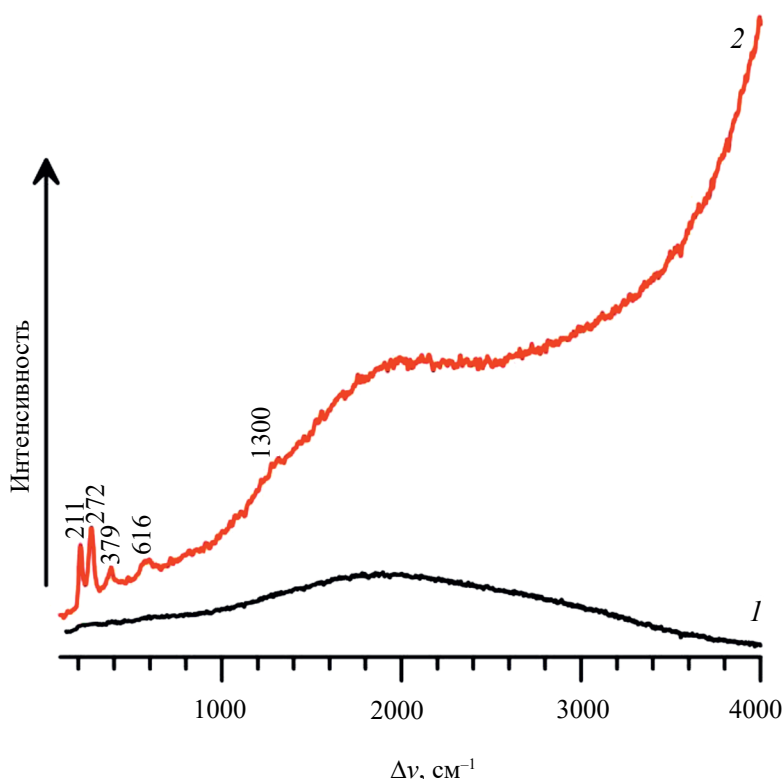


Рис. 3. КР-спектры осадка гидроксида железа(III), полученного при pH 7: 1 – съемка при $P = 1$ мВт; 2 – съемка при $P = 5$ мВт (продолжительность съемки в обоих случаях – 10 с).

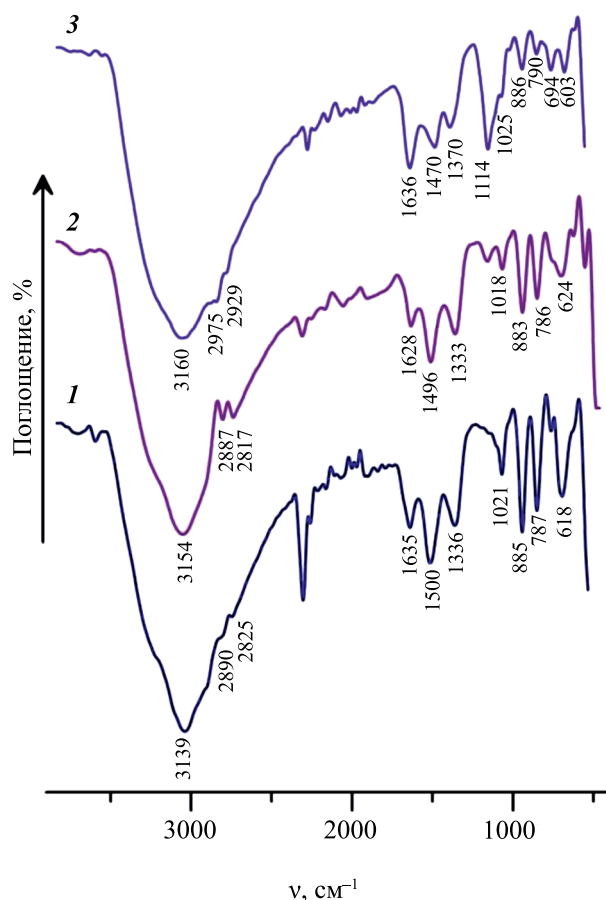


Рис. 4. ИК-спектры осадков гидроксида железа(III): 1 и 2 — осаждение при pH 8 и 7 соответственно; 3 — осаждение при pH = 7 с последующей сорбцией ионов никеля на образовавшемся осадке.

молекул воды ν (H_2O) присутствует интенсивная широкая полоса при $3139\text{--}3160\text{ см}^{-1}$. При $1628\text{--}1636\text{ см}^{-1}$ регистрируется деформационная мода молекул воды δ (H_2O). Валентные асимметричные и симметричные колебания ν (CO_3^{2-}) проявляются в виде широких полос при $1470\text{--}1500$, $1333\text{--}1370$ и $1018\text{--}1025\text{ см}^{-1}$, а деформационные колебания δ (CO_3^{2-}) — при $883\text{--}886\text{ см}^{-1}$. Эти полосы, как мы уже отмечали выше, обусловлены, по-видимому, присутствием карбонатов в образовавшихся осадках. Асимметричные и симметричные валентные колебания связи C—H проявляются при $2887\text{--}2975\text{ см}^{-1}$ и $2817\text{--}2929\text{ см}^{-1}$ соответственно. Появление этих полос в ИК-спектрах осадков обусловлено, как показал анализ, наличием небольших органических примесей в исходном реактиве NaOH, из которого готовился раствор гидроксида натрия (10 г/л) для подщелачивания модельного раствора в ходе экспериментов. Кроме того, в осадках возможно

появление также небольшой примеси гидрокарбоната железа(III) FeOHCO_3 . Это соединение могло образоваться в процессе осаждения гидроксида железа(III) раствором NaOH, т.к. последний в качестве примеси всегда обычно содержит соду Na_2CO_3 , а также в результате поглощения раствором углекислого газа из воздуха в ходе эксперимента. Для образцов 1 и 2 полосы от деформационных колебаний C—H-связей накладываются на моды, принадлежащие иону CO_3^{2-} . Полосы с частотами $883\text{--}886$, $786\text{--}790$ и $603\text{--}624\text{ см}^{-1}$ могут быть отнесены к деформационным колебаниям связей C—H и C—C. Частоты ниже 600 см^{-1} можно отнести к колебаниям Fe—O. Ни на одном из ИК-спектров, так же как и ранее на КР-спектрах, не зафиксированы полосы поглощения, характерные для OH-групп, не входящих в состав воды и принадлежащих осадку гидроксида железа(III), если бы он соответствовал брутто-формулам FeOON или $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Необходимо отметить, что, по данным работ [12–21], на ИК-спектрах гетита также отсутствуют полосы поглощения в районе $3600\text{--}3700\text{ см}^{-1}$, характерные для OH-групп, не входящих в состав молекул воды.

На рис. 5 показаны результаты термогравиметрического анализа образовавшихся осадков гидроксида железа(III). В одном случае (рис. 5а) осадок был осажден из модельного раствора при pH 7. В другом (рис. 5б) — при pH 8 с последующей сорбцией на нем ионов никеля.

Из рис. 5 видно, что термограммы обоих осадков близки между собой. У них нет принципиальных и существенных отличий. Уже при небольшом нагреве из осадков начинает удаляться вода (МС-кривая $m/z = 18$ а.е.м) и диоксид углерода (МС-кривая $m/z = 44$ а.е.м.). Этот процесс продолжается вплоть до температуры $180 \pm 5^\circ\text{C}$. Дальнейшее повышение температуры сопровождается заметным выделением газообразного диоксида углерода и незначительного количества воды. При этом потеря массы происходит ступенчато. Примерно $10.2\text{--}10.4\%$ массы теряется на первой ступени и еще около 7% — на второй. При дальнейшем повышении температуры у образца, полученного при pH 8 (рис. 5б), наблюдается слабо выраженная третья ступень, где масса осадка уменьшается еще примерно на $0.5\text{--}1\%$. Это снижение массы данного осадка обусловлено главным образом выделением из него углекислого газа. В результате общее уменьшение массы осадков составляет около 18% . Следу-

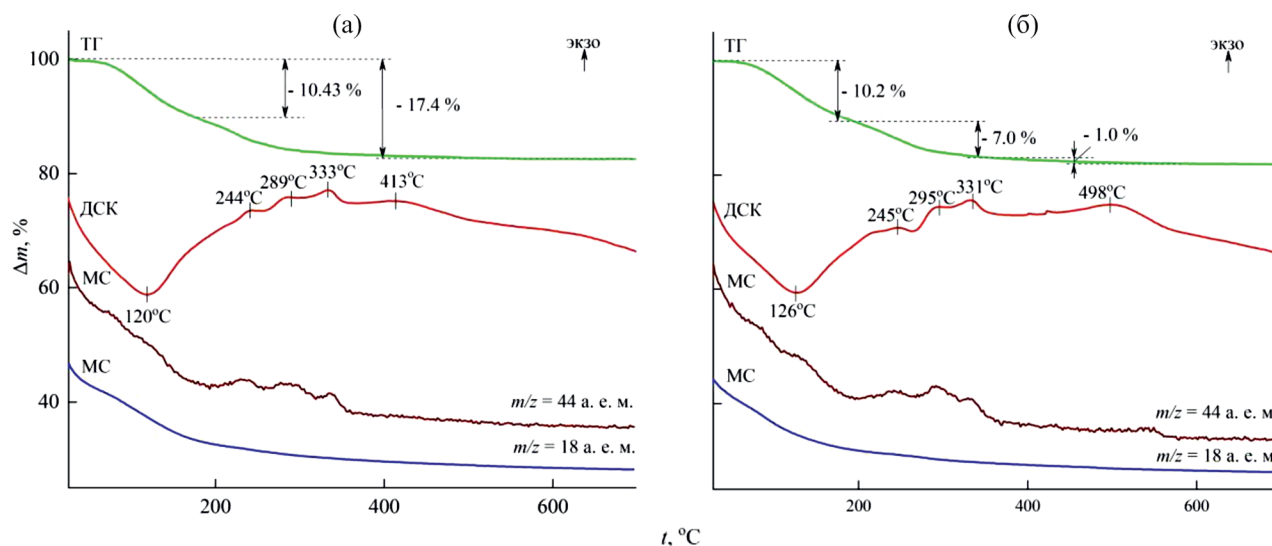


Рис. 5. ТГ-, ДСК- и МС-кривые осадков гидроксида железа(III), осажденных из модельного раствора: (а) — при pH 7 и (б) — при pH 8, с последующей сорбцией ионов никеля на образовавшемся осадке. Δm — изменение массы осадка; t — температура, °C.

ет отметить, что максимумы удаления диоксида углерода в пределах ошибки определения идентичны для обоих образцов. Ступенчатый характер выделения диоксида углерода свидетельствует о присутствии углерода в образцах в трех различных энергетических состояниях. Процесс сопровождается для обоих образцов слабыми экзоэффектами при 244 ± 1 , 293 ± 2 и 331 ± 1 °C. Экзоэффекты, наблюдаемые при температурах 413 и 498 °C, соответствуют, по-видимому, процессу кристаллизации гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. На это указывает рентгенофазовый анализ осадков после проведенного термогравиметрического анализа. Наблюдаемое выделение углекислого газа обусловлено, видимо, с одной стороны, его десорбцией с образцов, а с другой — постепенным термическим разложением возможных органических и карбонатных примесей в осадках, о наличии которых свидетельствуют их ИК спектры (рис. 4). Анализ образцов на экспресс-анализаторе Метавакс-CS-30 показал, что общее содержание в них углерода составляет 0.73 и 1.2 мас% соответственно. Следовательно, убыль массы осадков при их нагреве обусловлена в основном их дегидратацией. Поэтому с учетом того, что КР- и ИК-спектры не подтвердили наличие в образцах ОН-групп, не входящих в состав молекул воды, а убыль массы осадков при термогравиметрическом анализе составляет около 18%, им можно приписать брутто-формулу:

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$. Заметим, что если бы осадки состояли из гетита ($\alpha\text{-FeOOH}$) и лепидокрокита ($\gamma\text{-FeOOH}$), то с учетом отсутствия в структуре последних ОН-групп, не связанных с водой, они имели бы брутто-формулу $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$, и потеря массы осадков при термогравиметрическом анализе составила бы около 10%. Кроме того, согласно опубликованным данным, ТГ-кривые при дегидратации гетита или лепидокрокита имеют вид, отличный от наблюдаемого в наших экспериментах (рис. 5) [17, 22–24]. Так, при нагреве гетита или лепидокрокита до 200 °C вначале обычно имеет место небольшая (не более 5%) убыль массы, связанная с потерей адсорбированной воды. Затем, при примерно 200 °C, на ТГ-кривой наблюдается резкий перегиб с последующей потерей массы около 10%. Причем дегидратация, в отличие от осадков гидроксида железа(III), полученных в данной работе, происходит одноступенчато [17, 22–24]. Если предположить, что гидроксид железа(III), образовавшийся в наших экспериментах, представляет собой смесь двух фаз, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$, то тогда для согласования с данными термогравиметрического анализа соотношение между этими фазами должно быть следующим: $(\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \times 3\text{H}_2\text{O})$. Содержание $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ в таком смешанном осадке должно составлять около 45 мас%. При столь высоком содержании фазы $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ в

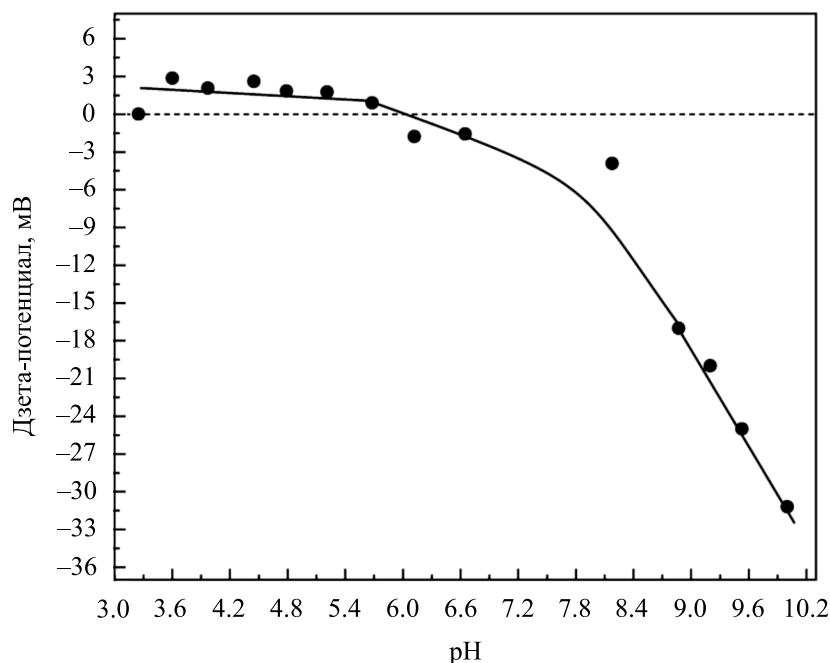


Рис. 6. Зависимость дзета-потенциала частиц гидроксида железа(III) от pH модельного раствора.

осадке она должна уверенно регистрироваться рамановской спектроскопией, а на ТГ-кривых должен быть заметный перегиб в районе 200°C. Однако этого не наблюдается. Таким образом, с учетом сказанного можно заключить, что в данном случае имеет место образование гидроксида железа(III) с брутто-формулой $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ с небольшой примесью гетита и лепидокрокита.

Образование гидроксида железа(III) с брутто-формулой $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ранее было зафиксировано в работах [25, 26]. При этом полученный в [25] осадок был рентгеноаморфным. Отсутствие OH-групп у осадков гидроксида железа(III), осажденных из аммиачных растворов при pH 10 и 13, было установлено методом ИК-спектроскопии в работе [26].

На рис. 6 показана зависимость дзета-потенциала частиц осадка гидроксида железа(III) от pH раствора. Видно, что дзета-потенциал частиц осадка гидроксида железа(III), образовавшихся в наших экспериментах при pH < 6 имеет положительное значение, а при pH > 6 становится отрицательным. Точка нулевого заряда соответствует pH 6, что очень близко к данным [7], однако значительно отличается от результатов работ [27, 28], где pH точки нулевого заряда

для частиц гидроксида железа(III) в форме ферригидрита был равен 8.4 и 8.8 соответственно. Наблюдаемое расхождение, как и ранее [7], мы связываем с присутствием сульфат-ионов в модельном растворе.

Рис. 6 свидетельствует о том, что при pH > 6 наблюдается рост (по абсолютной величине) отрицательного заряда частиц осадка гидроксида железа(III). Полученная зависимость почти совпадает с аналогичной кривой для частиц осадка гидроксида железа(III), осажденных из раствора FeCl_3 [7]. Следует отметить также, что в [7, 8] при pH 7 наблюдалось снижение величины адсорбционной емкости осадков гидроксида железа(III) по отношению к ионам никеля с ростом начальной концентрации ионов железа(III) в растворе и напротив ее постоянство при pH 8. Этот эффект мы связываем с протеканием процесса коагуляции частиц осадка гидроксида железа(III) [7]. При pH 7, вследствие низкого значения дзета-потенциала частиц осадка, их коагуляция (агрегация) протекает сильнее и образуется сильно агрегированный осадок гидроксида железа(III) с низкой удельной поверхностью. При pH 8 дзета-потенциал частиц осадка возрастает и образующийся осадок слабо

агрегирован. Поэтому его удельная поверхность почти не меняется с изменением начальной концентрации ионов железа(III) в растворе.

В рассматриваемых экспериментах, в отличие от [7, 8], влияние начальной концентрации ионов железа в растворе на величину адсорбционной емкости осадков гидроксида железа(III) сохраняется и при pH 8: с ростом начальной концентрации ионов железа(II) в растворе адсорбционная емкость образовавшихся осадков гидроксида железа(III) по отношению к ионам никеля падает [1], т.е. по-прежнему формируется агрегированный осадок. По-видимому, в данном случае это связано с различиями в структуре и составе образовавшихся осадков гидроксида железа(III). Последним также, видимо, обусловлено их отличие в сорбционных свойствах по отношению к ионам никеля от осадков гидроксида железа(III), осажденных из раствора FeCl_3 [7, 8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования осадков гидроксида железа(III), осажденных при pH 7 и 8 из раствора сульфата железа(II) в присутствии сульфата натрия (400 мг/л), показали, что они имеют брутто-формулу $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ и содержат также небольшие количества гетита ($\alpha\text{-FeOOH}$) и лепидокрокита ($\gamma\text{-FeOOH}$). Об этом свидетельствуют данные рентгенофазового и термогравиметрического анализов, а также результаты КР- и ИК-спектроскопии. Дзета-потенциал частиц этих осадков при $\text{pH} < 6$ имеет положительное значение, а при $\text{pH} > 6$ становится отрицательным. Точка нулевого заряда частиц осадков соответствует pH 6.

Сорбция ионов никеля на полученных осадках гидроксида железа(III) не сопровождается хемосорбцией, т.е. образованием смешанных соединений между железом и никелем.

Различие в сорбционных свойствах осадков гидроксида железа(III) по отношению к ионам никеля, осажденных из растворов сульфата железа(II) и хлорида железа(III), обусловлено отличиями в их структуре и составе: в первом случае осадок имеет брутто-формулу $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$, во втором — образуется двухлинейчатый ферригидрит с брутто-формулой $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ИХТТ УрО РАН, а

также при финансовой поддержке Правительства Свердловской области и Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-48-660038.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линников О.Д., Родина И.В. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2024. Т. 60. С. 14–24.
2. Kiyama M. and Takada T. // Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1972. V. 45. P. 1923–1924.
3. Misawa T., Yashimoto K. and Shimodaira S. // Corrosion Science. 1974. V. 14. P. 131–149.
4. Deng Y. // Wat. Res. 1997. V. 31. № 6. P. 1347–1354.
5. Клещёва Р.Р., Жеребцов Д.А., Мирасов В.Ш., Клещёв Д.Г. // Вестник ЮУрГУ. 2012. № 1. С. 17–22.
6. Петрова Е.В., Дресвянников А.Ф., Цыганова М.А. et al. // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 2. С. 24–32.
7. Линников О.Д., Родина И.В., Захарова Г.С. et al. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2023. Т. 59. № 1. С. 28–35.
<https://doi.org/10/31857/S0044185622060110>
8. Линников О.Д., Родина И.В. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2022. Т. 58. № 6. С. 574–582.
<https://doi.org/10.31857/S0044185622060109>
9. Hanesch M. // Geophysical Journal International. 2009. V. 177. P. 941–948.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04122.x>
10. de Faria D.L., Venâncio Silva S., de Oliveira M.T. // Journal of raman spectroscopy. 1997. V. 28. P. 873–878.
11. Legodi M.A., de Waal D. // Dyes and Pigments. 2007. V. 74. P. 161–168.
<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.01.038>
12. Власов А.Я., Лосева Г.В., Сакаш Г.С., Солнцева Л.С. // Журнал прикладной спектроскопии. 1970. Т. 12. № 6. С. 1130–1133.
13. Sato K., Sudo T., Kurosawa F., Kamori O. // J. Japan Inst. Metals. 1969. V. 33. P. 1371–1376.
https://doi.org/10.2320/jinstmet1952.33.12_1371
14. Cambier P. // Clay Minerals. 1986. V. 21. № 2. P. 191–200.
<https://doi.org/10.1180/claymin.1986.021.2.08>
15. Рахимова О.В. // Вестник КИГИТ. 2010. № 5. С. 109–113.
16. Прохоренко В.А., Худайбергенава Э.М., Жаркынбаева Р.А. // International journal of applied and fundamental research. 2022. № 5. P. 44–48.
17. Худайбергенава Э.М., Ли С.П., Жаркынбаева Р.А. // Вестник МУК. 2022. Т. 45. № 1. С. 143–147.
18. Li Y., Lv G., Wu L., Li Z., Liao L. // Crystals. 2023. V. 13. P. 79.
<https://doi.org/10.3390/cryst13010079>

19. *Ristić M.* // Journal of Alloys and Compounds. 2006. V. 417. P. 292–299.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.09.043>
20. *Villacis-Garcia M., Ugalde-Arzate M., Vaca-Escobar K. et al.* // Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana. 2015. V. 67. № 3. P. 433–446.
21. *Gast R.G., Landa E.R., Meyer G.W.* // Clays & Clay Minerals. 1974. V. 22. P. 31–39.
<https://doi.org/10.1346/ccmn.1974.0220106>
22. *Боева Н.М.* // Автореферат дисс. доктора геол.-мин. наук. М., 2016. 47 с.
23. *Kosmulski M., Durand-Vidal S., Mazcka E., Rosenholm J.B.* // J. Colloid Interface Sci. 2004. V. 271. P. 261–269.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.10.032>
24. *Paterson E., Swaffield R.* // Journal of Thermal Analysis. 1980. V. 18. № 1. P. 161–167.
<https://doi.org/10.1007/bf01909464>
25. *Берг Л.Г., Прибылов К.П., Егунов В.П., Абдурахманов Р.А.* // Журнал неорганической химии. 1969. Т. XIV. № 9. С. 2303–2306.
26. *Ахманова М.В., Малофеева Г.И. и Андреева Н.П.* // Журнал аналитической химии. 1976. Т. XXXI. № 3. С. 447–453.
27. *Liu J., Zhu R., Ma L., Fu H. et al.* // Geoderma. 2021. V. 383. P. 114799.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114799>
28. *Villalobos M., Antelo J.* // Re. Int. Contam. Ambie. 2011. V. 27. № 2. P. 139–151.