

DOI: 10.15593/2224-9400/2020.3.11

УДК 661.635:532.135

**Л.С. Ещенко¹, О.В. Понятовский¹, Э.И. Вечерская¹,
Е.В. Коробко², З.А. Новикова²**

¹Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь

²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОГО ФЕРРИФОСФАТА

Представлены условия химического осаждения рентгеноаморфного ортофосфата железа состава $FePO_4 \cdot 2,5H_2O$ и гидротермальной кристаллизации $FePO_4 \cdot 2H_2O$, имеющего моноклинную структуру. Исследован процесс и продукты термической дегидратации $FePO_4 \cdot 2,5H_2O$ и $FePO_4 \cdot 2H_2O$. Установлена зависимость количества удаляемой воды от температуры и продолжительности дегидратации кристаллического $FePO_4 \cdot 2H_2O$. Показано влияние температуры на фазовый состав продуктов термообработки. Приведена схема фазовых превращений, протекающих при термообработке гидратированных железозосфатов. Установлены температурные интервалы образования и формирования кристаллических безводных железозосфатов со структурой тридимита и кварца, которые использовали как дисперсную фазу в электрореологических суспензиях. Исследована электрореологическая активность (ЭР-активность) электрореологических суспензий (ЭРС), содержащих безводный железозосфат со структурой тридимита и кварца. Показана зависимость ЭР-активности суспензий от структуры и дисперсности безводного железозосфата, продолжительности ее формирования при заданной температуре, природы исходного гидрата железозосфата. Исследованы условия получения безводного железозосфата как электрочувствительного наполнителя ЭРС. Отмечено, что значение напряжения сдвига (τ , Па) при напряженности электрического поля $E = 4$ мВ/мм достигает 340 Па для ЭРС на основе тридимитоподобного железозосфата, полученного термообработкой при 550 °С в течение 90 мин.

Ключевые слова: химическое осаждение, кристаллизация, гидратированный ортофосфат железа, тридимитоподобная структура, кварцеподобная структура, безводный железозосфат, термическая дегидратация, фазовый состав, дисперсность, наполнитель, электрореологическая суспензия, электрореологический эффект (ЭР-эффект).

**L.S. Eshchenko¹, A.V. Paniatouski¹, E.I. Vecherskaya¹,
E.V. Korobko², Z.A. Novikova²**

¹Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus
²A.V. Lykov Institute of heat and mass transfer of the national Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

PECULIARITIES OF OBTAINING ELECTORRHEOLOGICAL ACTIVE FERROPHOSPHATE

The conditions of chemical deposition of x-ray amorphous iron orthophosphate of $\text{FePO}_4 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ composition and hydrothermal crystallization of $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ having a monoclinic structure are presented. The process and products of thermal dehydration of $\text{FePO}_4 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ and $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ were studied. The dependence of the amount of water removed on the temperature and duration of dehydration of crystalline $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ is established. The influence of temperature on the phase composition of heat treatment products is shown. The scheme of phase transformations occurring during heat treatment of hydrated iron phosphates is given. Temperature intervals of formation and formation of crystalline anhydrous iron phosphates with the structure of tridymite and quartz, which were used as a dispersed phase in electrorheological suspensions, were established. The electrorheological activity (ER-activity) of electrorheological suspensions (ERS) containing anhydrous iron phosphate with the structure of tridymite and quartz was studied. The dependence of the electrorheological activity of suspensions on the structure and dispersion of anhydrous iron phosphate, the duration of its formation at a given temperature, and the nature of the initial iron phosphate hydrate is shown. The conditions for obtaining anhydrous iron phosphate as an electrosensitive filler of ERS are studied. It is noted that the value of the shear stress (τ , Pa) at the electric field strength $E = 4 \text{ mV/mm}$ reaches 340 Pa for ERS based on tridymite-like iron phosphate obtained by heat treatment at 550 °C for 90 minutes.

Keywords: *chemical precipitation, crystallization, hydrated iron orthophosphate, tridymite-like structure, quartz-like structure, anhydrous iron phosphate, thermal dehydration, phase composition, dispersion, filler, electrorheological suspension, electrorheological effect (ER-effect).*

Согласно [1–3], электрореологические жидкости (ЭРЖ) – умные синтетические жидкости, меняющие свою вязкость от жидкого до полутвердого состояния в течение миллисекунд при применении достаточно сильного электрического или магнитного поля. Эти материалы привлекли значительный интерес в связи с их широким спектром применения: в гасителях вибрации для систем подвески транспортных средств, для крепления сейсмической защиты сооружений, в робототехнике, для медицинских целей и других целей [4].

Как показывает мировой опыт, основная роль в создании эффективных электроуправляемых материалов многофункционального дейст-

вия принадлежит дисперсной фазе, обеспечивающей требуемые теплофизические и механические характеристики демпфирующих жидкостей и пленок. В качестве дисперсной фазы (наполнителя) электрореологических суспензий (ЭС) используют природные и синтетические химические соединения. При создании ЭС наибольшее распространение получили водосодержащие и безводные неорганические соединения [5–11], среди которых особый интерес представляют как гидратированные, так и безводные фосфаты поливалентных металлов, отличающиеся разнообразием химического и фазового состава, структур, физико-химических характеристик, что обусловлено особенностями свойств как поливалентных металлов, так и соединений фосфора.

В работах [9–11] исследованы ЭС на основе водосодержащих фосфатов металлов и отмечено, что транспорт протонов в объеме вещества обуславливает его протонную проводимость, что и определяет проявление электрореологических свойств. При этом активатором ЭР-эффекта могут быть и молекулы кристаллизационной воды, что показано на примере ортофосфатов алюминия состава $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [12].

Однако наиболее распространенными наполнителями ЭС являются более химически и термически стабильные безводные химические соединения. Сведения об их электрореологической активности, в том числе и безводных фосфатов металлов, крайне ограничены, хотя многие из них в силу особенностей строения, структуры и свойств, могут явиться эффективными наполнителями ЭС. Особенно это можно отнести к изоструктурному ряду фосфатов трехвалентных металлов, в частности Al, Fe, V, Ga, Cr и других, для которых характерно наличие ряда структур со специфическими свойствами.

Исходя из этого, целью данной работы явилось исследование электрореологической активности ЭС на основе безводного ортофосфата железа в зависимости от условий его получения и структуры. Ортофосфат железа $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, как и алюмофосфат $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, в природе встречается в виде модификаций: моноклинной и орторомбической. Минералогическое название моноклинной – фосфосидерит, орторомбической – штрэнгит. Фосфосидерит, как и штрэнгит, являются дигидратами $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ортофосфат железа может быть получен в рентгеноаморфном и кристаллическом состоянии различными способами: осаждением ортофосфорной кислотой или раствором двухзамещенного фосфата натрия из растворов железосодержащих солей; взаимодействием свежесозданного гидроксида железа с ортофосфорной кислотой; нейтрализацией фосфорнокислого раствора железа карбона-

том натрия или взаимодействием ортофосфорной кислоты с металлическим железом [13, 14].

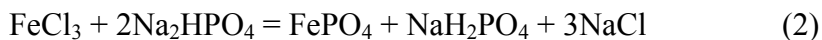
Обобщая исследования, выполненные с целью получения модификаций трехзамещенного ортофосфата железа, можно отметить, что фосфосидерит, как и штрэнгит, можно получить в гидротермальных условиях либо взаимодействием железо- и фосфорсодержащих соединений, либо гидролизом однозамещенного ортофосфата железа. В отличие от синтеза штрэнгита характерным условием для образования моноклинной модификации трехзамещенного ортофосфата железа – фосфосидерита является наличие сильно кислой среды ($\text{pH} \leq 1,0$) [13].

Согласно классическим представлениям процесс дегидратации кристаллогидрата ортофосфата железа протекает по схеме



Между тем появился достаточно обширный материал, показывающий, что обезвоживание сопровождается частичным или полным разрушением структуры исходной соли с образованием сложных по химическому составу и строению соединений. Показано существование разновидностей безводного железозфосфата, получаемого из фосфосидерита и штрэнгита, при этом отмечено образование как тридимитоподобной, так и кварцеподобной формы FePO_4 [13, 15].

Экспериментальная часть. Для синтеза исходного гидратированного ортофосфата железа использовали химическое осаждение согласно реакции



и метод гидротермальной кристаллизации гидратированного ортофосфата железа.

При осаждении ортофосфата железа к 1 М раствору FeCl_3 при 70 °С по каплям добавляли подогретый 1 М раствор Na_2HPO_4 при постоянном перемешивании и непрерывном измерении рН среды. Образовавшуюся суспензию выдерживали при указанной температуре в течение 12–13 ч, после чего твердую фазу отделяли на вакуумфилт্রে. Одну часть осадка отмывали методом декантации до отрицательной реакции на хлорид-ионы. Отмытый осадок сушили сначала при температуре 40–50 °С, затем 70–80 °С до постоянной массы.

Другую часть осадка помещали в химически и термически стойкие колбы с притертыми пробками, куда добавляли дистиллированную воду и фосфорную кислоту для достижения рН 0,9–1,0. Колбы выдер-

живали при температуре 96–97 °С в течение 48 ч. После этого осадок отделяли от жидкой фазы, промывали до отрицательной реакции на ортофосфат-анион, затем сушили, как описано ранее.

Содержание Fe_2O_3 , P_2O_5 определяли фотоколориметрическим методом, H_2O – термогравиметрическим по известным методикам. Фазовый состав синтезированных образцов устанавливали с помощью дифрактометра 08 Advance фирмы Bruker AXS (Германия). Гранулометрический анализ образцов проводили на лазерном микроанализаторе распределения частиц по размерам Analysette 22 фирмы FRITSH (Германия). ЭРС готовили путем растирания наполнителя и трансформаторного масла (добавляли по каплям) в агатовой ступке в течение 1,5–2,0 ч до однородной консистенции. Содержание наполнителя ($FePO_4$) в суспензии составляло 20,0 мас.%. Экспериментальную оценку электрореологической чувствительности суспензий при комнатной температуре проводили на ротационном вискозиметре Rheotest 2.1. Ток утечки измерялся миллиамперметром M1109 с ценой деления 1 мкА. Исследования выполнялись в лаборатории реофизики и макрокинетики института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 представлены условия получения и результаты исследования образцов железозфосфата, полученных как описано выше.

Таблица 1

Условия получения гидратированного ортофосфата железа и результаты его исследования

| Номер образца гидратированного ортофосфата | Условия получения | | | | Результаты исследования | | |
|--|--|-----------|----------------|-----------------|-------------------------|---|--|
| | Мольное соотношение $Na_2HPO_4/FeCl_3$ | рН | | Температура, °С | | мольное соотношение $Fe_2O_3:P_2O_5:H_2O$ | фазовый состав |
| | | осаждения | кристаллизации | осаждения | кристаллизации | | |
| 1 | 0,95–1,0 | 0,65–0,70 | – | 70–75 | – | 1:1,06:4,85 | Рентгено-аморфный |
| 2 | | 0,65–0,70 | 0,95–1,00 | 70–75 | 95–97 | 1:0,98:4,05 | Кристаллический, структура моноклинная, минералогическое название фосфосидерит |

Как следует из представленных данных, при описанных условиях получен железофосфат (образец № 1), состав которого, согласно химическому анализу, можно описать как $\text{FePO}_4 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$. Данное соединение не имеет явно выраженной кристаллической решетки и является рентгеноаморфным.

Химический анализ образца № 2 на содержание Fe_2O_3 , P_2O_5 , H_2O показал, что мольное соотношение $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, равное 0,98, соответствует ортофосфату железа. На основании гравиметрического анализа сделан вывод, что полученное соединение является дигидратом $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Рентгенограмма данного соединения идентична рентгенограмме $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с моноклинной структурой, имеющего минералогическое название фосфосидерит.

На рис. 1 представлена зависимость числа молей удаляемой воды от температуры и продолжительности нагревания кристаллического $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

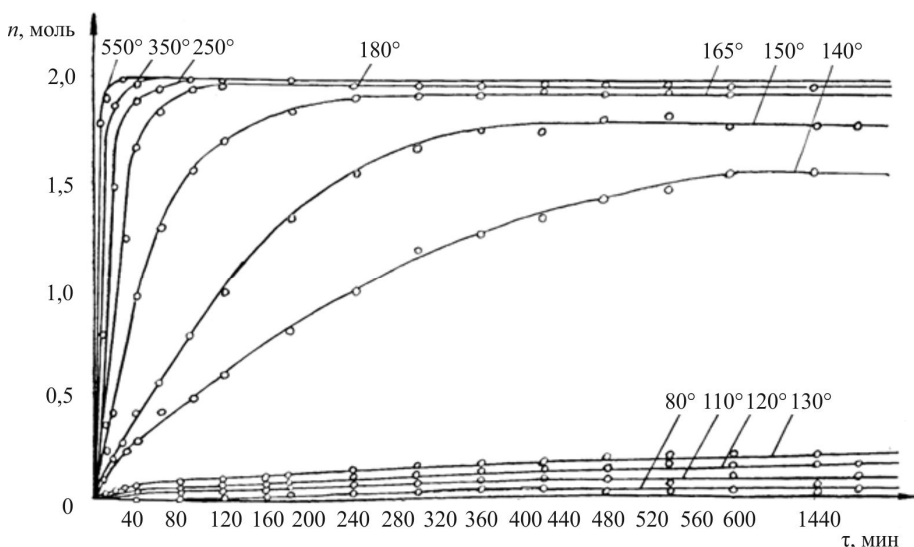


Рис. 1. Кривые дегидратации кристаллического $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

На рис. 1 видно, что количество удаляемой кристаллизационной воды из исследуемого образца железофосфата зависит как от продолжительности нагревания, так и от температуры. Практически полное обезвоживание фосфата железа наблюдается уже при температуре 180°C в течение 80 мин. При этом отщепляется 2 моль воды. Увеличение температуры, как следует из рис. 1, интенсифицирует процесс изотермической дегидратации железофосфата.

Согласно термогравиметрическому анализу, полное обезвоживание рентгеноаморфного железofосфата происходит при более низкой температуре, в частности при 160 °С. Продукты дегидратации $\text{FePO}_4 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ в интервале температур 80–500 °С рентгеноаморфны. Термообработка данного соединения выше 500 °С приводит к кристаллизации FePO_4 . На рентгенограмме образца, нагретого до 550 °С, появляются линии с дифракционными максимумами, характерными для тридимитоподобной формы безводного фосфата железа. Такая же кристаллическая фаза образуется при нагревании и образца № 2 ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), но до температуры 620 °С. Установлено, что тридимитоподобная фаза безводного железofосфата является метастабильной, и при повышении температуры термообработки до 700 °С происходит переход тридимита в кварц, т.е. формируется кварцеподобная фаза безводного железofосфата. Характерно, что термообработка $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ до температуры 600 °С сопровождается образованием кристаллической фазы, идентифицировать которую оказалось затруднительно.

Исходя из совокупности данных, составлена схема фазовых превращений, протекающих при термообработке рентгеноаморфного и кристаллического ортофосфата железа (рис. 2).

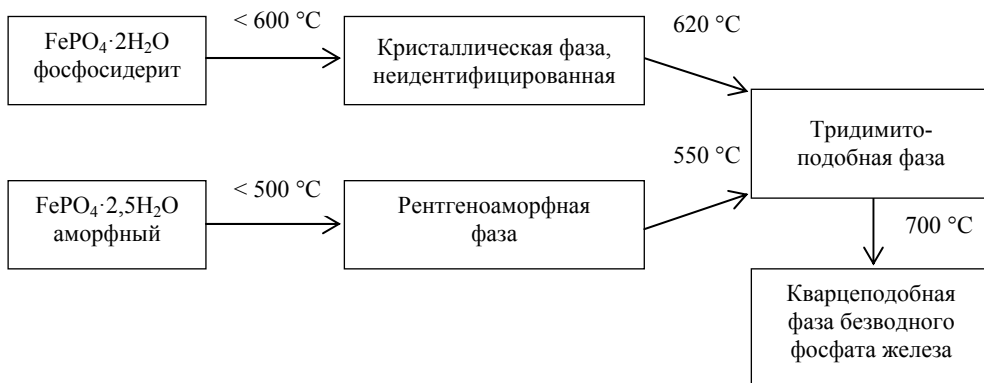


Рис. 2. Схема фазовых превращений, протекающих при термообработке гидратированных железofосфатов

Согласно данной схеме, конечной фазой термообработки исследуемых гидратированных железofосфатов является безводный FePO_4 , имеющий структуру одной из модификаций SiO_2 – α -кварца. Предшествующей структурой безводного железofосфата, как видно из схемы, является тридимит. Переход тридимитоподобной структуры безводного железofосфата в кварцеподобную осуществляется при температуре не менее 700 °С.

Исследована дисперсность гидратированного и безводного железозофосфатов. Из полученных экспериментальных результатов следует, что $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и безводный FePO_4 являются полидисперсными с размером частиц в интервале 0,2–50,0 мкм. Характерным для железозофосфатов является большая доля мелких частиц с размером 0,2–10,0 мкм (32,94 %) и более крупных от 20 до 50 мкм (33,05 %). Содержание частиц, имеющих размер 50,0–100,0 мкм, составляет не более 5,0 мас.%. Термообработка гидратированного железозофосфата приводит к укрупнению частиц за счет процесса спекания. Однако, как показали исследования дисперсности образцов железозофосфатов, процесс спекания и его скорость зависят от температуры термообработки. При 500–550 °С, когда при дегидратации $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ образуется и формируется тридимитоподобная фаза, распределение частиц по размерам для безводного фосфата железа сильно не отличается от распределения частиц по размерам для гидратированного железозофосфата. Повышение температуры термообработки до 700 °С и выше приводит к спеканию мелких частиц, в результате их доля уменьшается до 1,0–1,5 % (0,2–3,0 мкм), но увеличивается доля частиц размером 50–100 мкм до 10,0–11,0 %.

Исходя из результатов исследования, были определены условия для наработки образцов безводного ортофосфата железа для тестирования электрореологической активности ЭРС на их основе. Результаты исследования зависимости напряжения сдвига ЭРС, содержащих образцы FePO_4 , и тока утечки от напряженности электрического поля представлены в табл. 2 и на рис. 3. Из анализа данных следует, что электрочувствительность исследуемых образцов безводного ортофосфата железа сильно отличается. Значения напряжения сдвига ЭРС и плотности тока утечки при напряженности электрического поля 3,5–4 кВ/мм изменялись в зависимости от условий получения образцов FePO_4 , используемых как наполнители ЭРС (см. табл. 2).

Согласно экспериментальным данным, наполнители № 1 и 4, полученные термообработкой гидратированных ортофосфатов железа как при 550 °С, так и 700 °С в течение 0,5 ч, проявляют низкую электрочувствительность при высоких значениях тока утечки (см. рис. 3). В то же время увеличение продолжительности термообработки $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при температуре 550 °С способствует значительному возрастанию электрочувствительности получаемых наполнителей № 2 и 3 и, следовательно, ЭР-эффекта ЭРС на их основе (см. табл. 2, рис. 3).

Таблица 2

Условия получения наполнителей на основе железоросфатов и результаты исследования их электрореологической активности

| Номер наполнителя | Исходный гидратированный ортофосфат железа (согласно табл. 1) | Условия термообработки | | Структура | Оценка электрореологической активности | | | |
|-------------------|---|------------------------|------------------------|-------------------|---|---|--|---------------------------|
| | | температура T , °С | продолжительность, мин | | напряжение сдвига ЭРС, (τ , Па) при $E = 4$ кВ/мм | плотность тока утечки при $E = 4$ кВ/мм | содержание наполнителя в суспензии, мас. % | скорость сдвига, c^{-1} |
| 1 | Кристаллический, образец № 2 $Fe_2O_3:P_2O_5:H_2O = 1:0,98:4,05$ | 550 | 30 | Тридимитоподобная | 50 при $E = 1,5$ кВ/мм | Выше 30 при $E = 1,5$ кВ/мм | 20 | 200 |
| 2 | | | 60 | Тридимитоподобная | 220 | 3,9 | | |
| 3 | | | 90 | Тридимитоподобная | 340 | 3,6 | | |
| 4 | Рентгеноаморфный, образец № 1 $Fe_2O_3:P_2O_5:H_2O = 1,0:1,06:4,85$ | 700 | 30 | Кварцеподобная | 80 | 13,7 | 20 | 200 |
| 5 | | | 90 | Кварцеподобная | 60 | 0,8 | | |

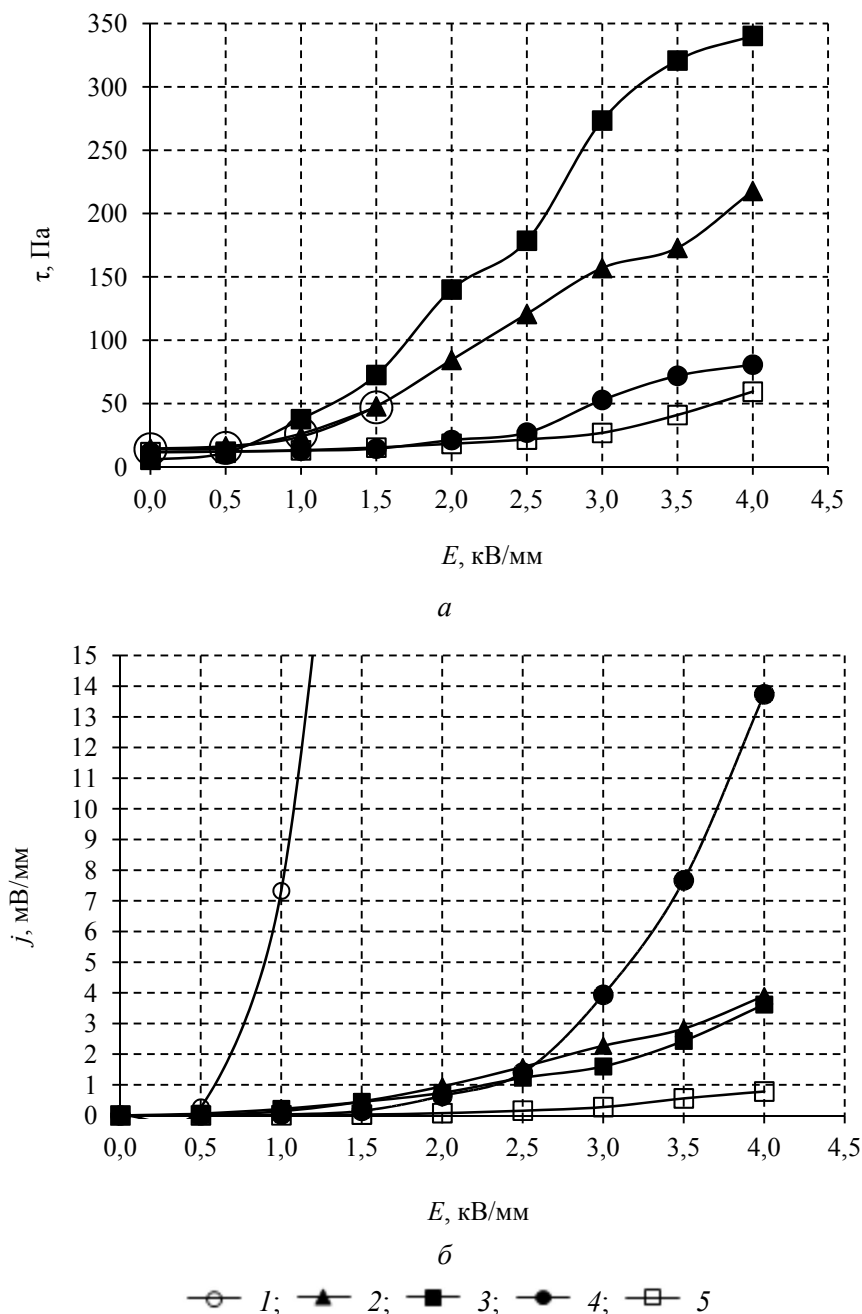


Рис. 3. Зависимость напряжения сдвига (а) и тока утечки (б) от напряженности электрического поля ЭРС № 1–5

Так, напряжение сдвига ЭРС, содержащих наполнители № 2, 3, при напряженности электрического поля 4 кВ/мм составляет 220 и 340 Па соответственно. Как отмечено выше, при данной температуре

стабильной является тридимитоподобная структура безводного ортофосфата железа. Характерно, что ЭРС на основе наполнителей, полученных при 700 °С и имеющих структуру кварца, являются электрореологически малоактивными (см. табл. 2, рис. 3).

Исходя из известных данных, наличие ЭР-эффекта для ЭРС, содержащих безводный FePO_4 , может быть связано с проявлением в электрическом поле «медленной» поверхностной поляризации, обусловленной смещением связанных зарядов в пределах двойного электрического слоя на границе раздела жидкость–частица наполнителя за счет наличия в нем структурных дефектов, дислокаций, трещин.

Исходя из химии твердого тела [16], различная электрочувствительность образцов FePO_4 , зависящая от условий их получения, может быть обусловлена несколькими причинами: степенью дисперсности образцов, т.е. размерной зависимостью свойств поверхности твердого тела; концентрацией дефектов и подвижностью входящих в их состав атомов или ионов; существованием метастабильных структурных модификаций с большей подвижностью атомов или ионов.

Низкую электрочувствительность FePO_4 , полученного при 550 и 700 °С в течение 30 мин, можно объяснить незавершенностью формирования структуры тридимита и, следовательно, минимальной энергией атомов, локализованных на поверхности частиц.

Согласно данным (см. табл. 2, рис. 3), продолжительность термообработки $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при 550 °С, при которой происходит формирование структуры тридимита, существенно влияет на электрочувствительность получаемых образцов наполнителя. Поскольку их дисперсность сильно не отличается, как было установлено, то данный факт можно объяснить повышением концентрации дефектов в формирующейся структуре тридимита. Снижение ЭР-эффекта для кварцеподобной структуры FePO_4 , образующейся в результате фазового перехода при 700 °С, скорее всего связано как с укрупнением частиц, что показано экспериментально, так и с уменьшением степени дефектности за счет процессов спекания.

Таким образом, анализ и обобщение экспериментального материала показывает, что электрочувствительность безводных ортофосфатов, в частности железа, определяется условиями их получения, влияющими на степень дисперсности образцов, на тип и дефектность структуры, что вносит вклад в поверхностную поляризацию частиц в электрическом поле.

Список литературы

1. Hao T. Electrorheological suspensions // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2002. – Vol. 97. – P. 1–35.
2. Lu K., Shen R., Wang X. Polar-molecule-dominated electrorheological (PM-ER) fluids: the properties and evaluations // *International Journal of Modern Physics*. – 2011. – Vol. 25, № 7. – P. 957–962.
3. Korobko E.V., Bedik N.A., Eshchenko L.S. ER-Activity of suspensions based on hydrated metal oxides // *Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions: Proceedings of the 12th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*. – Philadelphia, USA, 2011. – P. 293–299.
4. Коробко Е.В. Электроструктурированные (электрореологические) жидкости: особенности гидромеханики и возможности использования. – Минск, 1996. – 190 с.
5. Исследование влияния состава гидратированных оксидов хрома на их электрореологическую активность / Л.С. Ещенко, Е.В. Лаевская, Е.В. Коробко, Н.А. Бедик // *Коллоидный журнал*. – 2015. – Т. 77, № 3. – С. 311–317.
6. Time stability studies of electrorheological response of dispersions with different types of charge carriers / E.V. Korobko, Z.A. Novikova, E.S. Semyazhko, A.N. Murashkevich, L.S. Eshchenko // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2015. – Vol. 26, № 14. – P. 1782–1788.
7. Получение наполнителей для ЭРС на основе гидратированного ортофосфата алюминия / Л.С. Ещенко, Е.В. Лаевская, Е.В. Коробко, З.А. Новикова // *Труды БГТУ. Химия*. – 2015. – № 3. – С. 56–63.
8. Физико-химические и электрореологические свойства диоксида титана, модифицированного оксидами металлов / А.Н. Мурашкевич, О.А. Алисиенок, И.М. Жарский, Е.В. Коробко, Н.А. Журавский, З.А. Новикова // *Коллоидный журнал*. – 2014. – Т. 76, № 4. – С. 506–512.
9. Лапко К.Н., Макадун В.Н., Уголев И.И. Протонная структура кристаллического дигидрата дигидротриполифосфата алюминия // *Журнал неорганической химии*. – 1980. – Т. 6. – С. 1688–1691.
10. Уголев И.И., Потапович А.К., Макадун В.Н. Состояние и динамика воды в поликристаллических двуводных фосфатах алюминия // *Докл. АН БССР*. – 1977. – Т. 21, № 3. – С. 232–235.
11. Characteristics of charge transport in the disperse phase of electrorheological suspensions / V.N. Makatun, K.N. Lapko, A.D. Matsepuro, V.F. Tikavyi // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 1983. – Vol. 45, № 4. – P. 1138–1142.
12. Влияние структуры дигидрата ортофосфата алюминия на его электрореологическую активность / Е.В. Лаевская, Л.С. Ещенко, Е.В. Коробко, З.А. Новикова, Х.И. Унал // *Тепло- и массоперенос-2014: сб. науч. тр. / Ин-т*

тепло- и массопереноса им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2015. – С. 263–270.

13. Ещенко Л.С. Основные закономерности образования фосфатов трехвалентных металлов и разработка научных основ их получения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1992. – 40 с.

14. Получение ортофосфата железа: пат. № 2530126 Рос. Федерация / Гуннар Бюллер, Килиан Шварц; № 2011139174/05; заявл. 19.02.2010; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28. – 20 с.

15. Ещенко Л.С., Печковский В.В., Продан И.Е. Влияние термообработки на состав и свойства ортофосфатов железа // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1986. – Т. 16, № 9. – С. 1601–1605.

16. Ярославцев А.Б. Химия твердого тела. – М.: Научный мир, 2009. – 328 с.

References

1. Hao T. Electrorheological suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2002, vol. 97, pp. 1–35.

2. K. Lu, R. Shen, X. Wang. Polar-molecule-dominated electrorheological (PM-ER) fluids: the properties and evaluations. *International Journal of Modern Physics*, 2011, vol. 25, no. 7, pp. 957–962.

3. Korobko E.V., Bedik N.A., Eshchenko L.S. ER-Activity of suspensions based on hydrated metal oxides. *Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions: Proceedings of the 12th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*. Philadelphia, USA, 2011, pp. 293–299.

4. Korobko E.V. Elektrostrukturirovannye (elektрореологические) zhidkosti: osobennosti gidromekhaniki i vozmozhnosti ispol'zovaniia [Electrostructured (electrorheological) fluids: features of hydromechanics and possibilities of use] Minsk, 1996, 190 p.

5. Eshchenko L.S., Laevskaia E.V., Korobko E.V., Bedik N.A. Issledovanie vliianiia sostava gidratirovannykh oksidov khroma na ikh elektрореологичесkuiu aktivnost' [A study of the effect of the composition of hydrated chromium oxides on their electrorheological activity]. *Colloid Journal*, 2015, vol. 77, no. 3, pp. 311–317.

6. Korobko E.V., Novikova Z.A., Sermiyazhko E.S., Murashkevich A.N., Eshchenko L.S. Time stability studies of electrorheological response of dispersions with different types of charge carriers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, vol. 26, no. 14, pp. 1782–1788.

7. Eshchenko L.S., Laevskaia E.V., Korobko E.V., Novikova Z.A. Poluchenie napolnitelei dlia ERS na osnove gidratirovannogo ortofosfata aliuminiia [Preparation of fillers for ERS based on hydrated aluminum orthophosphate]. *Trudy BSTU, seriia khimiia*, 2015, no. 3, pp. 56–63.

8. Murashkevich A.N., Alisienok O.A., Zharskii I.M., Korobko E.V., Zhuravskii N.A., Novikova Z.A. Fiziko-khimicheskie i elektroeologicheskie svoystva dioksida titana, modifitsirovannogo oksidami metallov [Physico-chemical and electrorheological properties of titanium dioxide modified by metal oxides]. *Colloid Journal*, 2014, vol. 76, no. 4, pp. 506–512.

9. Lapko K.N., Makatun V.N., Ugolev I.I. Protonnaia struktura kristallicheskogo digidrata digidrotripolifosfata aliuminiia [Proton structure of the crystalline dihydrate of aluminium dihydrotripolyphosphate]. *Zhurnal neorganicheskoi khimii*, 1980, vol. 6, pp. 1688–1691.

10. Ugolev I. I., Potapovich A. K., Makatun V. N. Sostoianie i dinamika vody v polikristallicheskikh dvuvodnykh fosfatakh aliuminiia [State and dynamics of water in polycrystalline aluminum phosphate dihydrates]. *Doklady Akademii nauk BSSR*, 1977, vol. 3, pp. 232–235.

11. Makatun V.N., Lapko K.N., Matsepuro A.D., Tikavyi V.F. Characteristics of charge transport in the disperse phase of electrorheological suspensions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1983, vol. 45, no. 4, pp. 1138–1142.

12. Laevskaia E.V., Eshchenko L.S., Korobko E.V., Novikova Z.A., Unal Kh.I. Vliianie struktury digidrata ortofosfata aliuminiia na ego elektroeologicheskuiu aktivnost' [Influence of the structure of aluminum orthophosphate dihydrate on its electrorheological activity]. *Teplo- i massoperenos-2014. Sbornik nauchnykh trudov*. Minsk, Institut teplo- i massoperenosa imeni A.V. Lykova natsional'noi akademii nauk Belarusi, 2015, pp. 263–270.

13. Eshchenko L.S. Osnovnye zakonomernosti obrazovaniia fosfatov trekhvalentnykh metallov i razrabotka nauchnykh osnov ikh polucheniia [Main regularities of formation of phosphates of trivalent metals and development of scientific bases for their production]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Saint Petersburg, 1992, 40 p.

14. Gunnar Biuller, Kilian Shvarts. Poluchenie ortofosfata zheleza [Preparation of iron orthophosphate]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2011139174/05 (2014).

15. Eshchenko L.S., Pechkovskii V.V., Prodan I.E. Vliianie termoobrabotki na sostav i svoystva ortofosfatov zheleza [Influence of heat treatment on the composition and properties of iron orthophosphates]. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Neorganicheskie materialy*, 1986, vol. 16, no. 9, pp. 1601–1605.

16. Iaroslavtsev A.B. Khimiia tverdogo tela [Solid state chemistry]. Moscow, Nauchnyj Mir, 2009, 328 p.

Получено 30.07.2020

Об авторах

Ещенко Людмила Семеновна (Минск, Беларусь) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а).

Понятовский Олег Витальевич (Минск, Беларусь) – магистрант кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а).

Вечерская Эллада Ивановна (Минск, Беларусь) – младший научный сотрудник, заведующая учебной лабораторией кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а).

Коробко Евгения Викторовна (Минск, Беларусь) – доктор технических наук, профессор, заведующая лабораторией реофизики и макрокинетики, Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15).

Новикова Зоя Анатольевна (Минск, Беларусь) – младший научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15).

About the authors

Lyudmila S. Eshchenko (Minsk, Republic of Belarus) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006).

Aleh V. Paniatouski (Minsk, Republic of Belarus) – Undergraduate Student, Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006).

Ellada I. Vecherskaya (Minsk, Republic of Belarus) – Junior Research Assistant, Head of the educational laboratory, Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006).

Evgeniya V. Korobko (Minsk, Republic of Belarus) – Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the laboratory of rheophysics and macrokinetics, A.V. Lykov Institute of heat and mass transfer of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovki str., Minsk, 220072).

Zoya A. Novikova (Minsk, Republic of Belarus) – Junior Research Assistant, A.V. Lykov Institute of heat and mass transfer of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovki str., Minsk, 220072).