

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.15593/2224-9400/2018.3.07

УДК 546.723+546.742+531.212;691.316

Л.С. Ещенко, Д.М. Новик, К.В. Бородина

Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМОЩЕЛОЧНОЙ КОНВЕРСИИ СУЛЬФАТА ЖЕЛЕЗА (II) НА СОСТАВ И СВОЙСТВА ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРОДУКТОВ

Исследованы процесс и продукты термощелочной конверсии $FeSO_4$ в системах $FeSO_4-Na_2CO_3(CaCO_3)-H_2O-O_2$. Показано влияние содержания H_2O в реакционной смеси на степень конверсии сульфата железа, химический, фазовый состав промежуточных и целевых продуктов, образующихся на стадиях механической и термической обработки реакционной смеси.

Установлено, что в интервале температур 550–600 °C образуются высокодисперсные железоксидные фазы, обеспечивающие интенсивность цвета получаемых продуктов и их малярно-технические свойства, в частности кроющую способность.

Показано, при термощелочной конверсии железного купороса в присутствии $CaCO_3$ образуется пигмент-наполнитель, содержащий пигменты $\alpha-Fe_2O_3$, $\gamma-Fe_2O_3$ и наполнитель $CaSO_4$ с примесью феррита кальция, имеющий коричнево-красный цвет, укрывистость 28–29 г/м².

Железоксидный пигмент, образующийся в системе $FeSO_4-Na_2CO_3-H_2O-O_2$ путем термощелочной конверсии $FeSO_4$, имеет укрывистость 7–8 г/м² и насыщенный темный красно-коричневый цвет.

Ключевые слова: железоксидный пигмент, укрывистость, гематит, маггемит, термощелочная конверсия, пигмент-наполнитель.

L.S. Eshchenko, D.M. Novik, K.V. Borodina

Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

THE EFFECT OF THERMAL-ALKALINE CONVERSION OF IRON SULFATE (II) ON THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF THE PRODUCTS BEING GENERATED

The article dwells upon the examination of the process of thermal-alkaline conversion and its products in the systems $FeSO_4-Na_2CO_3(CaCO_3)-H_2O-O_2$. the authors consider the effect of H_2O content in the reaction mixture on the degree of conversion of iron sul-

fate, chemical, phase composition of intermediate and end products formed in the stages of mechanical and thermal processing of the reaction mixture.

It has been established that highly dispersed iron oxide phases are formed under the temperature range 550-600 °C and ensure the color intensity as well as paint and technical properties of the products obtained, in particular their tinting power.

It has been shown that a pigment filler containing pigments α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ and a CaSO₄ filler with an admixture of calcium ferrite having a brownish-red color and a hiding power of 28-29 g / m² are formed in the presence of CaCO₃ during the thermal alkaline conversion of iron sulfate.

The iron oxide pigment formed in the FeSO₄-Na₂CO₃-H₂O-O₂ system by the thermal alkaline conversion of FeSO₄ has a saturated dark reddish-brown color and hiding power of 7-8 g/m².

Keywords: *iron oxide pigment, hiding power, hematite, maghemite, thermal alkaline conversion, pigment filler.*

Одними из наиболее распространенных и востребованных пигментов являются железооксидные, которые представляют собой оксиды и гидроксиды железа. Окраска таких пигментов зависит от их состава, дисперсности, формы частиц и характеризуется светлыми или темными оттенками черного, коричневого, красного, оранжевого, желтого цветов. Согласно литературным данным [1, 2], основой железооксидных пигментов являются гетит α -FeOOH, лепидокрокит, γ -FeOOH, гематит α -Fe₂O₃, маггемит γ -Fe₂O₃, магнетит Fe₃O₄. При определенных условиях большинство из указанных оксидов и гидроксидов способно переходить друг в друга [2].

Имеются многочисленные исследования, посвященные химизму и механизму образования оксо- и гидроксоформ при гидролизе солей железа (II) и (III). В большей степени изучены процессы окисления и гидролиза сульфата железа (II), в частности, железного купороса Fe₂SO₄·7H₂O, как наиболее распространенного сырья для получения железосодержащих пигментных материалов. Установлено, что в зависимости от температуры, концентрации раствора, pH, ионной силы, присутствия лигандов происходит образование разнообразных моно- и полидисперсных железосодержащих аква-, гидроксо- и оксосоединений. Исходя из известных данных относительно процессов образования и формирования железосодержащих фаз гетита, маггемита, гематита разработаны «мокрые» способы получения желтых, коричневых и красных пигментов, включающие стадии осаждения, отделения осадка от жидкой фазы и его отмывку, сушку и термообработку. Недостатком данных способов является их многостадийность, наличие большого объема сточных вод, энергоемкость. Для упрощения процесса получе-

ния пигментных материалов несомненный интерес представляет способ, основанный на щелочной конверсии сульфата железа (II), протекающей в системе $FeSO_4$ –щелочной агент– H_2O – O_2 , содержащей минимальное количество свободной H_2O , с последующей термообработкой реакционной смеси. Исследование процесса окисления Fe^{2+} и гидролиза ионов железа в таких системах крайне ограничено.

Ранее нами исследован процесс термощелочной конверсии сульфата железа в системе $FeSO_4$ – CaO – H_2O – O_2 с целью получения железокальциевого пигмента-наполнителя для окрашивания силикатного кирпича [3]. Целью данной работы является изучение состава и свойств продуктов, образующихся при термощелочной конверсии $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ в присутствии карбонатсодержащих соединений, в частности $CaCO_3$ и Na_2CO_3 .

Экспериментальная часть. Для исследования процесса конверсии сульфата железа использовали мел (содержание $CaCO_3$ – 98,5 мас. %), кальцинированную соду (содержание Na_2CO_3 – 99,3 мас. %), железный купорос состава, мас. %: $FeSO_4$ – 47,8; H_2SO_4 – 1,2; кристаллизационная H_2O – 47,3; свободная H_2O – 3,7. Процесс проводили следующим образом: железный купорос помещали в лабораторный блендер, интенсивно перемешивали и небольшими порциями вводили карбонат кальция или натрия. Мольное соотношение щелочной реагент : SO_4^{2-} составляло 1,05. Содержание воды в системе варьировали от 38,1 (H_2O , поступившая с железным купоросом) до 47,2 мас. % путем ввода H_2O . После выдержки реакционной смеси на воздухе в течение 6–12 ч ее подвергали механической обработке в шаровой мельнице в течение 2–3 мин. Затем смесь, образующуюся в системе $FeSO_4$ – $CaCO_3$ – H_2O – O_2 , подвергали термообработке в неподвижном слое в интервале температур 200–600 °C в течение 30–60 мин. Для системы $FeSO_4$ – Na_2CO_3 – H_2O – O_2 после стадии механической обработки проводили отмывку реакционной смеси от Na_2SO_4 расчетным, согласно растворимости сульфата натрия, количеством воды, для получения насыщенного раствора сульфата натрия в данных условиях. Твердую фазу сушили и термообработывали как описано выше.

Фазовый состав продуктов термощелочной конверсии устанавливали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре «Дрон-4» с излучением $\lambda_{CuK\alpha} = 1,5405 \text{ \AA}$. Содержание железа (II) и (III) определяли аналитически по известным методикам. Свободную серную кислоту в составе технического железного купороса определяли кислотно-основным титрованием с $NaOH$ в присутствии метилового оранжевого. Для расчета

степени конверсии железного купороса, взаимодействующего с CaCO_3 , определяли содержание SO_4^{2-} в продуктах на разных стадиях процесса путем их прокаливания при температуре 700–800 °С. Выходящий из печи газ взаимодействовал в склянках Дрекселя с раствором йода, по количеству которого рассчитывали содержание диоксида серы и затем SO_4^{2-} . Степень конверсии $\text{FeSO}_4(\text{II})$ в системе с Na_2CO_3 рассчитывали с учетом содержания SO_4^{2-} в твердой и жидкой фазах при отмывке продуктов от сульфата натрия. Содержание карбонат-ионов устанавливали газовольтометрическим методом, сульфат-ионов – гравиметрическим по известным методикам. Исследование укрывистости пигментных материалов проводили согласно стандартной методике, для чего навеску образца смешивали с натуральной олифой в массовом соотношении 1:1 и полученную смесь наносили тонким слоем на стеклянную, взвешенную с точностью до 0,0002 г пластинку до исчезновения просвета между черными и белыми квадратами шахматной доски, подложенной под стекло, затем пластинку взвешивали с той же точностью и рассчитывали укрывистость в г/м^2 . Размер частиц пигментных материалов устанавливали с помощью лазерного микроанализатора Analysette 22 фирмы FIRTSH. Их форму исследовали методом электронной сканирующей микроскопии с использованием микроскопа Jeol JSM-5610LV.

Результаты и их обсуждение. При смешении железного купороса с карбонатсодержащими соединениями, в частности CaCO_3 , Na_2CO_3 , и механической обработке реакционной смеси одновременно протекает ряд сложных процессов, таких как растворение, окисление и гидролиз FeSO_4 , нейтрализация протонсодержащих соединений и разложение карбонатов с выделением CO_2 , в результате чего происходит комплексобразование метастабильных железосодержащих фаз, состав и структура которых определяется рядом факторов, в частности соотношением $\text{H}_2\text{O} : \text{FeSO}_4$. Результаты исследования влияния содержания H_2O в системе $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - \text{CaCO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{O}_2$ на степень конверсии FeSO_4 и состав продуктов, образующихся после механической обработки, представлены в таблице. Исследования показали, что при введении 2–9 мас. % H_2O в реакционную смесь степень конверсии сульфата железа резко возрастает и может достигать 99–98 % уже на стадии механической обработки.

Для образца 6, полученного при содержании в реакционной смеси только H_2O , вносимой с железным купоросом, степень конверсии составляет 50,6 %, после термообработки при 600 °С в течение 1 ч достигает только 75 %.

Условия процесса конверсии и состав продуктов, образующихся в реакционной системе $FeSO_4-CaCO_3-O_2-H_2O$

Номер образца	Условия синтеза		Степень конверсии после механической обработки, %	Содержание после механической обработки, мас. %			Фазовый состав		
	Мольное соотношение $Ca^{2+}:SO_4^{2-}$	Массовое содержание H_2O в реакционной смеси, мас. %*		CO_2	FeO	Fe_2O_3	после механической обработки	после термообработки, °С	
								400	600
1		47,2	99,0	6,2	0,12	26,20	$CaSO_4$	$CaSO_4$	
2		46,3	98,2	5,96	0,16	25,10	$Fe_4(SO_4)(OH)_{10}$	$xCaO \cdot \gamma Fe_2O_3$	
3		44,7	98,0	5,38	0,20	24,10	$\alpha-FeOOH$	$\alpha-Fe_2O_3$	
4		42,7	97,8	5,01	0,24	23,20	$\gamma-FeOOH$	$\gamma-Fe_2O_3$	
5	1,05	40,5	97,8	4,96	0,24	23,00	$\alpha-FeOOH$ $\gamma-Fe_2O_3$	$\alpha-Fe_2O_3$ $\gamma-Fe_2O_3$	
6		38,1	50,6	4,47			$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ $Fe_4(SO_4)(OH)_{10}$ $Fe_4(SO_4)(OH)(H_2O)_5$ $\alpha-FeOOH$ $\gamma-FeOOH$	– $xCaO \cdot \gamma Fe_2O_3$ $Fe_2(SO_4)_3$ $\alpha-Fe_2O_3$ $\gamma-Fe_2O_3$	

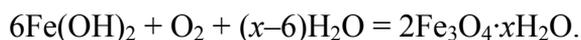
* Из них 38,1 мас. % H_2O , вносимой с железным купоросом.

Установлено, что содержание CO_3^{2-} -ионов в реакционной смеси после механической обработки зависит от условий получения образца. Согласно экспериментальным данным (см. таблицу), в образце 6 содержание карбонатов достигает 4,47 % в пересчете на CO_2 , что можно объяснить низкой степенью конверсии сульфата железа и наличием непрореагировавшего CaCO_3 в реакционной смеси. В то же время содержание карбонатов в продуктах щелочной конверсии 1–5 с ростом содержания воды возрастает и для образца 1, степень конверсии которого равна 99,0 %, составляет 6,2 % в пересчете на CO_2 . Следовательно, наличие CO_3^{2-} -ионов для образцов 1–5 может быть следствием образования железокarbonатсодержащих комплексных соединений в результате разложения CaCO_3 и выделения CO_2 , который сорбируется на поверхности реакционных продуктов гидролиза сульфата железа [2, 4].

Как следует из экспериментальных данных, содержание Fe(II) в образующихся продуктах составляет 0,12–0,24 мас. %, при этом повышение массовой доли воды в исследуемой системе, согласно данным таблицы, способствует росту степени окисления Fe^{2+} до Fe^{3+} и переходу по всей вероятности, нестабильных промежуточных комплексных соединений гидросолей двух- и трехвалентного железа в полиморфные модификации FeOОН, идентифицированы рентгенофазовым анализом. В составе продуктов, образующихся в процессе смешения железного купороса с CaCO_3 и H_2O и механической обработки реакционной смеси, присутствуют слабоокристаллизованные железосодержащие фазы α -FeOОН (2 θ 17,68; 20,69; 25,31; 36,99; 47,22°) и γ -FeOОН (2 θ 13,19; 36,25; 48,32; 49,89; 52,07°), а также протекает кристаллизация $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (2 θ 20,08; 28,48; 30,53; 32,87; 42,85°). Кроме модификации FeOОН, можно отметить и наличие в реакционной смеси основных сульфатов железа, которые имеют переменный состав и рентгенографически проявляются набором пиков с очень низкой интенсивностью. Обращает на себя внимание тот факт, что при содержании в реакционной смеси только кристаллизационной воды (образец 6) процесс окисления и гидролиза FeSO_4 направлен в сторону образования не только основных сульфатов, но и $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ идентифицируемых рентгенографически малоинтенсивными пиками при 2 θ 10,13; 16,79; 25,87; 31,50; 44,95°.

В ряде работ [2, 5–8] отмечено, что образование α -FeOОН или γ -FeOОН определяется, в первую очередь, областью pH, в которой протекает процесс окисления Fe^{2+} в Fe^{3+} , а также химическим составом

реакционной смеси, природой анионов, скоростью окисления. Отмечено, что щелочная среда и ионы SO₄²⁻ стимулируют формирование только структуры α-FeOOH, так же как и ионы CO₃²⁻. Образование двух модификаций FeOOH (α-FeOOH, γ-FeOOH) при щелочной конверсии FeSO₄ в присутствии CaCO₃, скорее всего, связано с влиянием состава реакционной смеси и pH среды, влияющей на скорость окисления Fe²⁺ в Fe³⁺. В нейтральной области pH, как известно, преимущественно формируется структура γ-FeOOH. Данное предположение подтверждается результатами исследования продуктов, образующихся в процессе конверсии в системе FeSO₄–Na₂CO₃–H₂O–O₂ с содержанием H₂O в тех же пределах, что и в системе FeSO₄–CaCO₃–H₂O–O₂. При использовании в качестве щелочного реагента карбоната натрия pH реакционной среды находится на уровне 11,0 и в составе продуктов, образующихся после механической обработки реакционной смеси рентгенографически идентифицирована только фаза α-FeOOH, кроме которой также присутствуют Fe₃O₄, Fe₂(SO₄)₃·nH₂O, FeOH·SO₄·2H₂O. Отличительной особенностью щелочной конверсии FeSO₄ в присутствии Na₂CO₃ является высокая скорость окисления Fe²⁺ в щелочной среде, способствующей образованию, как отмечено [5], нейтральных комплексов [Fe(OH)₂(H₂O)₄]⁰, которые конденсируются с формированием Fe(OH)₂, превращающегося в присутствии кислорода воздуха в магнетит согласно уравнению [9]



Авторами работы [10] также отмечена возможность в щелочной среде постепенного перехода Fe(OH)₂ в α-FeOOH.

Исследование процесса термообработки продуктов щелочной конверсии сульфата железа в присутствии CaCO₃ и Na₂CO₃ показало, что основная потеря их массы происходит в диапазоне температур от 20 до 450 °С, обусловленная дегидратацией водосодержащих соединений, разложением железокарбонатсодержащих нестабильных промежуточных комплексов. Согласно рентгенофазовому анализу, термообработанные при 400 °С образцы, полученные в системе FeSO₄–CaCO₃–H₂O–O₂, содержат как модификации гидратированного оксида железа (α-FeOOH, γ-FeOOH), а также Fe₃O₄, α-Fe₂O₃, γ-FeOOH и CaSO₄. Характерно, что железосодержащие фазы являются слабокристаллизированными. Повышение температуры термообработки до 600 °С сопровождается дальнейшим формированием кристаллических фаз, в ча-

стности гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) в результате дегидратации $\alpha\text{-FeOOH}$, $\gamma\text{-FeOOH}$, соответственно, и кальцийжелезосодержащей фазы $x\text{CaO}\cdot y\text{Fe}_2\text{O}_3$, которая на рентгенограмме проявляется малоинтенсивными пиками при 2θ 10,20; 16,12; 33,08; 33,84; 41,46; 46,32; 50,43. Исходя из полученных рентгенографических данных можно предположить о наличии в продуктах термообработки примеси феррита кальция вследствие взаимодействия промежуточных, метастабильных реакционно-способных продуктов с избыточным CaCO_3 . Термообработка продуктов, образующихся в системе $\text{FeSO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O-O}_2$, и отмытых от Na_2SO_4 , при 600 °С сопровождается образованием и формированием только фазы $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Известно, что цветовой тон железосодержащих фаз определяется их химическим, фазовым составом и структурой. Так, для гематита характерен цвет от оранжевого до фиолетового, маггемита – коричневый, магнетита – черный. Как отмечено в многочисленных исследованиях, оттенок цвета зависит от размера и формы частиц. Мелкие частицы (0,35–0,45 мкм) гематита имеют, как правило, светлые оттенки, более крупные (1,0–1,5 мкм) – темные, размером 2,5 мкм и более – пурпурные. Также отмечено, что форма частиц светлых оттенков пластинчатая, а темных – зернистая. Определение размера частиц исследуемых продуктов, полученных в системах $\text{FeSO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3(\text{CaCO}_3)\text{-H}_2\text{O-O}_2$ и термообработанных в интервале температур 400–600 °С показало, что диаграммы распределения частиц по размерам железокальцийсульфатсодержащего продукта и железокислородного соединения в общем имеют схожий вид (рис. 1). Диаграммы распределения частиц по размерам для образцов, полученных конверсией железного купороса в присутствии CaCO_3 (рис. 1, а) и Na_2CO_3 (рис. 1, б) характеризуются наличием двух основных пиков в диапазоне 4–50 мкм и небольшим содержанием частиц размером менее 4 мкм.

Примечательно, что несмотря на одинаковые условия термощелочной конверсии в системах $\text{FeSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-O}_2$ и $\text{FeSO}_4\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O-O}_2$, более мелкие частицы характерны для железокальцийсодержащего продукта, преобладающий размер частиц которого 5–10 мкм, его доля составляет около 60 %. Образец на основе оксида железа имеет частицы размером, мкм: 20–50 (37,7 %); 10–20 (24,6 %); 5–10 (22,2 %) (см. рис. 1, а).

Следует отметить, что повышение температуры термообработки продуктов щелочной конверсии до 600 °С заметно уменьшает размер

частиц (рис. 2, а), что не характерно для образцов железокальцийсульфатсодержащих продуктов (рис. 2, б).

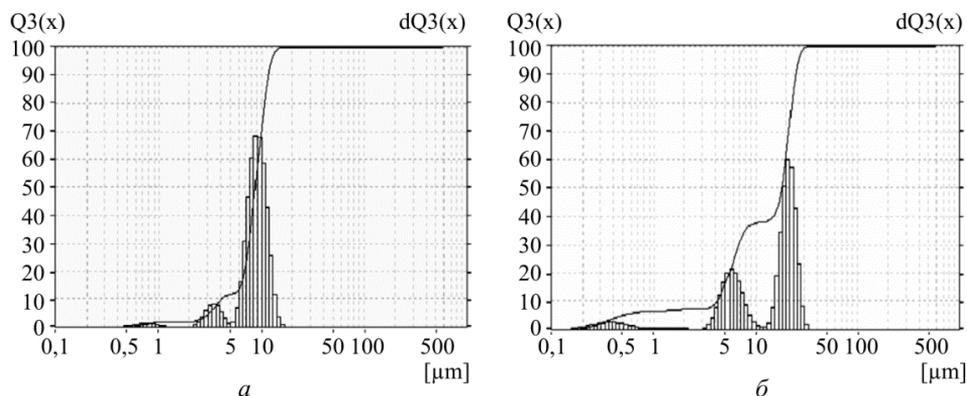


Рис. 1. Диаграммы распределения частиц по размерам железоксидного (а) и железокальцийсульфатсодержащего (б) продуктов, полученных при 550 °С

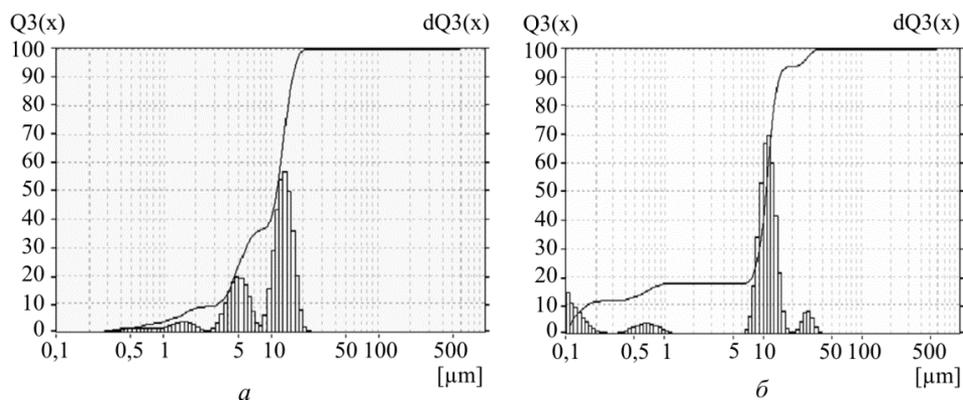


Рис. 2. Диаграммы распределения частиц по размерам железокальцийсульфатсодержащего (а) и железоксидного (б) продуктов, полученных при 600 °С

Данный факт можно объяснить фазовым составом продуктов, образующихся в результате физико-химических превращений, протекающих в системе $FeSO_4-CaCO_3-H_2O-O_2$ при термощелочной обработке сульфата железа (II). Увеличение доли частиц размером 10–20 мкм с 17,0 до 59,0 % может быть связано с образованием при повышении температуры новой фазы – феррита кальция, который, как показано ранее, идентифицируется рентгенографически в составе продуктов термообработки. Наличие малоинтенсивного пика на диаграмме распределения частиц по размерам железоксидного продукта (см. рис. 2, б) следу-

ет связать с появлением агломератов за счет агрегации частиц при термообработке высокодисперсного оксида железа.

Железокальцийсульфатсодержащие, железоксидные продукты, полученные при 550–600 °С, являются окрашенными соединениями, легко наносятся на поверхность, обладают высокой кроющей способностью. Результаты исследования кроющей способности (г/м^2) железокальцийсодержащих продуктов, которые представляют интерес как пигмент-наполнитель, приведены на рис. 3.

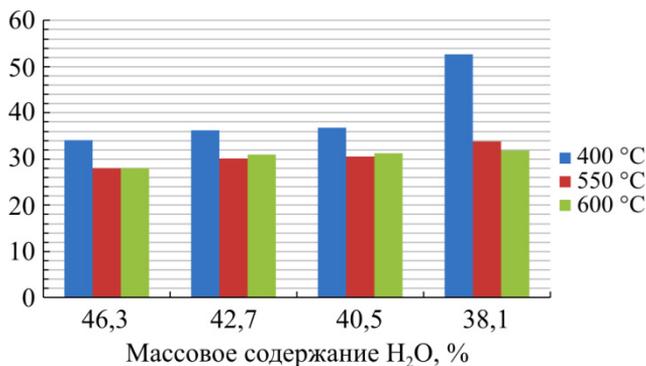


Рис. 3. Зависимость укрывистости железокальциевых пигментов-наполнителей от температуры и массового содержания H₂O в реакционной смеси

Анализ экспериментальных данных показывает, что укрывистость уменьшается (кроющая способность растет) с повышением содержания H₂O в исходной смеси и температуры термообработки до 550–600 °С. Достигаемое значение укрывистости 28–29 г/м^2 для исследуемых образцов соответствует требованиям, предъявляемым к пигментным материалам, в частности, пигментам-наполнителям. Для железоксидного продукта, образующегося в системе $\text{FeSO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O--O}_2$ и термообработанного при 550–600 °С, укрывистость составляет 7–8 г/м^2 , что находится на уровне известных железоксидных пигментов. Цвет железокальциевого пигмента-наполнителя, содержащего пигментные оксиды $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематит) и $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (маггемит), коричнево-красный, оттенок цвета – темный, что связано, как отмечалось выше, с размером частиц пигментных соединений. Железоксидный пигмент имеет темный красно-коричневый цвет.

Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что взаимодействие железного купороса со щелочными реагентами при его механической и термической активации приводит к образова-

нию ряда пигментных гидратированных и безводных модификаций оксида железа, фазовый и химический состав которых зависит от условий процесса. Варьируя типом щелочного реагента, составом реакционной смеси, в частности содержанием H_2O , можно целенаправленно при сравнительно низких температурах получать высокодисперсные продукты, представляющие интерес как пигментные материалы, в частности, железоксидные пигменты и пигменты-наполнители.

Список литературы

1. Vuxbaum L., Pfaff G. Industrial inorganic pigments: third, completely revised edition. – Germany: John Wiley & Sons, 2005. – 313 p.
2. Cornell R.M., Schwertmann U. Iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses. – Germany: John Wiley & Sons, 2003. – 664 p.
3. Образование и формирование структуры α - Fe_2O_3 при термической конверсии сульфата железа (II) / К. В. Бородина, Л. С. Ещенко, Д. М. Новик // Свиридовские чтения: сб. ст. / под ред. Т.В. Гаевской, М.В. Артемьева. – Минск: Изд-во БГУ, 2018. – С. 57–59.
4. Печенюк С.И. Сорбционно-гидролитическое осаждение платиновых металлов на поверхности неорганических сорбентов / под ред. В. А. Маслобоева. – Л.: Наука, 1991. – 244 с.
5. Iron oxides chemistry. From molecular cluster to extended soil network / J.P. Jolivet, C. Chaneac, E. Tronc // Chemical Communications. – 2004. – № 5. – P. 481–483.
6. Carlson L., Schwertmann U. The effect of CO_2 and oxidation rate on the formation of goethite versus lepidocrocite from an Fe (II) system at pH 6 and 7 // Clay materials. – 1990. – № 25. – P. 65–71.
7. Cudennec Y., Lecerf A. The transformation of ferrihydrite into goethite or hematite, revised // Journal of solid state chemistry. – 2006. – Vol. 179, № 9. – P. 716–722.
8. Schwertmann U., Fechter H. The formation of green rust and its transformation into lepidocrocite // Clay minerals. – 1994. – Vol. 29. – P. 87–92.
9. Неорганическая химия: химия переходных элементов. Кн. 2: учеб. пособие: в 3 т. / под. ред. Ю.Д. Третьякова [и др.]. – М.: Мир, 2004–2007. – Т. 3. – 400 с.
10. Попов В.В., Горбунов А.И. Закономерности образования нанокристаллических оксидов и оксигидроксидов железа (III) при окислении соединений железа (II) в щелочной среде // Журнал неорганической химии. – 2010. – Т. 55, № 10. – С. 1597–1603.

References

1. Buxbaum L., Pfaff G. Industrial inorganic pigments: third, completely revised edition. Germany: John Wiley & Sons, 2005, 313 p.
2. Cornell R.M., Schwertmann U. Iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses. Germany: John Wiley & Sons, 2003, 664 p.
3. Borodina K.V., Eshhenko L.S., Novik D.M. Obrazovanie i formirovanie struktury α -Fe₂O₃ pri termicheskoj konversii sul'fata zheleza (II) [The development and formation of the structure of α -Fe₂O₃ during the thermal conversion of ferrous sulfate (II)]. *Sviridovskie chteniia: sbornik statei*, Minsk, BGU, 2018, pp. 57-59.
4. Pecheniuk S.I. Sorbtionno-gidroliticheskoe osazhdenie platinovykh metallov na poverkhnosti neorganicheskikh sorbentov [Sorption-hydrolytic deposition of platinum metals on the surface of inorganic sorbents]. Ed. V.A. Masloboeva. Leningrad, Nauka, 1991, 244 p.
5. Jolivet J. P., Chaneac C., Tronc E. Iron oxides chemistry. From molecular cluster to extended soil network. *Chemical Communications*, 2004, no. 5, pp. 481-483.
6. Carlson L., Schwertmann U. The effect of CO₂ and oxidation rate on the formation of goethite versus lepidocrocite from an Fe(II) system at pH 6 and 7. *Clay materials*, 1990, no. 25, pp. 65-71.
7. Cudennec Y., Lecerf A. The transformation of ferrihydrite into goethite or hematite, revised. *Journal of solid state chemistry*, 2006, vol. 179, no. 9, pp. 716-722.
8. Schwertmann, U., Fechter H. The formation of green rust and its transformation into lepidocrocite. *Clay minerals*, 1994, pp. 87-92.
9. Neorganicheskaja khimiia: khimiia perekhodnykh elementov [Inorganic chemistry: chemistry of transitional elements]. Ed. Ju.D. Tret'jakov. Moscow, Mir, 2007, 400 p.
10. Popov V.V., Gorbunov A.I. Zakonomernosti obrazovaniia nanokristallicheskich oksidov i oksigidroksidov zheleza (III) pri okislenii soedinenii zheleza (II) v shchelochnoi srede [Common factors of nanocrystalline oxides and oxyhydroxides of iron (III) generation during the oxidation of iron (II) compounds in an alkaline medium]. *Zhurnal neorganicheskoi khimii*, 2010, vol. 55, no. 10, pp. 1597-1603.

Получено 26.07.2018

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).

Новик Дмитрий Михайлович (Минск, Беларусь) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а).

Бородина Ксения Владимировна (Минск, Беларусь) – магистр кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а).

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., 220006, Minsk).

Dmitry M. Novik (Minsk, Republic of Belarus) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk).

Kseniya V. Borodina (Minsk, Republic of Belarus) – master, Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk).