

ТЭХНІЧНАЯ ХІМІЯ І ХІМІЧНАЯ ТЭХНАЛОГІЯ
TECHNICAL CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERINGУДК 667.622.1+546.723
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-1-73-79>Поступила в редакцию 18.04.2024
Received 18.04.2024**Л. С. Ещенко¹, Р. А. Воронцов², В. С. Блинов³**¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь²ОАО «Белгорхимпром», Минск, Беларусь³ООО «Компания БКМ», Минская область, Беларусь**ПОЛУЧЕНИЕ ПИГМЕНТНОГО МАТЕРИАЛА КОНВЕРСИЕЙ**
ЖЕЛЕЗНОГО КУПОРОСА В ПРИСУТСТВИИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК

Аннотация. Исследован процесс получения пигментных материалов в системе $\text{FeSO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{CaCO}_3 - M - \text{O}_{2(\text{воздух})} - \text{H}_2\text{O}$, где M – неорганическая добавка ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, H_3PO_4 , H_3BO_3), с использованием микроволновой и термической обработки. Установлена зависимость степени конверсии соединений Fe (II) от условий проведения процесса и химического состава неорганической добавки. Показано, что степень конверсии соединений Fe (II) в присутствии $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ при заданных условиях в 1,5–2,0 раза выше по сравнению с H_3PO_4 и H_3BO_3 . Отмечено различие фазового и дисперсного состава продуктов, полученных после микроволновой, затем термической обработки в зависимости от типа добавки. Установлено, что исследуемые железокальцийсодержащие продукты содержат преимущественно высокодисперсную фазу с размером частиц 0,1–10,0 мкм, обладают пигментными свойствами и характеризуются насыщенным красно-коричневым цветом, на оттенки которого влияет состав неорганической добавки.

Ключевые слова: железный купорос, мел, конверсия, пигментный материал, модифицирующие добавки, сульфат алюминия, фосфорная кислота, борная кислота, степень конверсии, дисперсность

Для цитирования: Ещенко, Л. С. Получение пигментного материала конверсией железного купороса в присутствии неорганических добавок / Л. С. Ещенко, Р. А. Воронцов, В. С. Блинов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2025. – Т. 61, № 1. – С. 73–79. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-1-73-79>

L. S. Yeshanko¹, R. A. Vorontsov², V. S. Blinov³¹Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus²OJSC «Belgorkhimprom», Minsk, Belarus³LLC «Company BKM», Minsk Region, Belarus**OBTAINING PIGMENT MATERIAL BY CONVERSION OF GREEN VITRIOL**
IN THE PRESENCE OF INORGANIC ADDITIVES

Abstract. The process of obtaining pigment materials in the $\text{FeSO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{CaCO}_3 - M - \text{O}_{2(\text{air})} - \text{H}_2\text{O}$ system, where M is inorganic additive ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, H_3PO_4 , H_3BO_3), using microwave and heat treatment, has been studied. The dependence of the degree of conversion of Fe (II) compounds on the process conditions and chemical composition of inorganic additive has been established. It is shown that the degree of conversion of Fe (II) compounds in the presence of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ under given conditions is 1.5–2.0 times higher than that for H_3PO_4 and H_3BO_3 . The difference in the phase and dispersed composition of pigment materials obtained after microwave and heat treatment of the reaction mixture in the presence of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, H_3PO_4 , H_3BO_3 is noted. It was found that the studied iron–calcium-containing products mainly contain a highly dispersed phase with a particle size of 0.1–10.0 microns, have pigment properties and are characterized by a rich red-brown color, the shades of which are influenced by the composition of the inorganic additive.

Keywords: green vitriol, chalk, conversion, pigment material, modifying additives, aluminum sulfate, phosphoric acid, boric acid, conversion rate, dispersion

For citation. Yeshanko L. S., Vorontsov R. A., Blinov V. S. Obtaining pigment material by conversion of green vitriol in the presence of inorganic additives. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2025, vol. 61, no. 1, pp. 73–79 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-1-73-79>

Введение. Широкое использование пигментов на основе оксидов и оксигидроксидов железа (III) обусловлено их высокими малярно-техническими характеристиками, стойкостью к химическим и атмосферным воздействиям [1, 2]. В настоящее время актуальным является поиск путей производства железоксидных пигментов-наполнителей, одним из которых является смесь оксида железа (III) с сульфатом кальция (пат. RU 2451706 C1). Известно, что железокальцийсодержащий пигментный материал находит применение в производстве пластмассовых, резино-технических изделий, а также в различных лакокрасочных покрытиях. Его использование особенно перспективно в производстве строительных материалов, в частности силикатного кирпича, механическая прочность которого при этом возрастает [3].

Ранее нами исследован [4–6] процесс конверсии железного купороса в системе $\text{FeSO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{O}_2 (\text{воздух}) - \text{H}_2\text{O}$ и показано влияние ряда факторов, в том числе микроволновой обработки, на образование и формирование пигментной фазы $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Согласно экспериментальным данным железокальциевый пигмент содержит, мас. %: наполнитель в виде $\text{CaSO}_4 - 58,0$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 - 37,0$. Преобладающий размер частиц составляет 5–20 мкм, укрывистость находится на уровне 20–23 г/м², пигмент обладает насыщенным красно-коричневым цветом.

Исходя из многочисленных исследований видно, что в ряде случаев модифицирующие добавки в виде химических соединений влияют как на состав и свойства, так и процесс получения пигментных материалов. Так, авторы [7] для регулирования гранулометрического состава и физических свойств пигментов предлагают модифицировать их нанопорошками, представляющими собой оксиды металлов (ZnO , ZrO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , MgO , GeO_2). Согласно известным данным (пат. RU 2640550 C1) при получении красного железоксидного пигмента с целью снижения его полидисперсности перед стадией окислительного гидролиза в реакционную среду добавляли стабилизирующие добавки, такие как полифосфаты или силикаты натрия. В работе [8] показана эффективность поверхностного модифицирования мелкодисперсного красного железоксидного пигмента с использованием полиакрилата натрия, что позволяет повысить его стабильность и диспергируемость в водных системах. Отмечено (пат. RU 2767043 C1), что использование стабилизирующих добавок на стадии осаждения оксигидроксидов железа позволяет ускорить синтез красных пигментов на основе $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Из анализа ряда данных, опубликованных в литературе, следует, что использование добавок в виде органических, неорганических веществ с целью поверхностного и химического модифицирования является эффективным методом для повышения светостойкости, диспергируемости, смачиваемости пигментных материалов и интенсификации процесса их получения.

Целью данной работы явилось исследование влияния добавок в виде неорганических веществ ($M - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, H_3PO_4 , H_3BO_3) на процесс и продукты щелочной конверсии в системе $\text{FeSO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{CaCO}_3 - M - \text{O}_2 (\text{воздух}) - \text{H}_2\text{O}$.

Экспериментальная часть. В качестве исходных компонентов использовали железный купорос (мас. %: $\text{FeSO}_4 - 52,00$; $\text{H}_2\text{O}_{\text{общ}} - 46,97$; $\text{H}_2\text{SO}_4_{\text{своб}} - 0,98$; нерастворимый остаток – 0,05), мел (мас. %: $\text{CaCO}_3 - 90,00$; $\text{MgCO}_3 - 1,68$; $\text{H}_2\text{O} - 7,83$; нерастворимый остаток – 0,49), термическую фосфорную кислоту H_3PO_4 ($\rho = 1,2970$ г/см³), кристаллогидрат сульфата алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (ГОСТ 3758-75) и борную кислоту H_3BO_3 (ГОСТ 18704-78). В таблице представлено массовое соотношение между компонентами в реакционной смеси при синтезе железокальцийсодержащего пигментного материала, который осуществляли по ранее описанной методике [4].

Условия щелочной конверсии железного купороса в присутствии модифицирующих добавок
Conditions for alkaline conversion of ferrous sulfate in the presence of modifying additives

Номер образца	Массовое соотношение компонентов			Общее содержание воды в реакционной системе, мас. %
	$\text{CaCO}_3 : \text{FeSO}_4$	$\text{CaCO}_3 : \text{H}_2\text{O}$	$M : \text{FeSO}_4$	
1	0,71 : 1	1,05 : 1	0,02 : 1	48,50
2	0,71 : 1	1,05 : 1	0,02 : 1	48,50
3	0,73 : 1	1 : 1	0,02 : 1	48,00
4	0,73 : 1	1 : 1	–	48,30

Примечание. Образцы: 1 – с добавкой фосфорной кислоты; 2 – с добавкой сульфата алюминия; 3 – с добавкой борной кислоты; 4 – без добавки.

Насыщенный раствор сульфата Fe (II) смешивали с мелом и неорганической добавкой в лабораторном блендере. Фосфорную кислоту вносили в виде раствора с содержанием H_3PO_4 45 мас.%, сульфат алюминия и борную кислоту – в виде порошка. Общее содержание H_2O в реакционной смеси составляло 48,0–48,5 мас.% (с учетом воды, вносимой с реагентами и добавками). Полученную при интенсивном смешении компонентов пастообразную смесь подвергали микроволновой обработке при 70 Вт в течение 2–3 ч до полного удаления свободной воды в результате нагревания реакционной смеси до температуры 70–80 °С. Образовавшийся при этом продукт представлял собой твердые конгломераты, которые измельчали до порошкообразного состояния и классифицировали на сите с размером отверстий 0,056 мм. Далее последовательно проводили микроволновую обработку при 350, 500 и 700 Вт.

Анализ исходных реагентов, полупродуктов и продуктов осуществляли химическими методами: содержание FeO – методом окислительно-восстановительного титрования, Fe_2O_3 – методом комплексометрического титрования, SO_4^{2-} – гравиметрическим методом. Степень конверсии, характеризующая глубину протекания процесса окисления соединений Fe (II) в Fe (III), рассчитывали как отношение содержания окислившегося FeO к его содержанию в исходной реакционной смеси. Мощность микроволновой обработки косвенно определяли как номинальную потребляемую электроприбором мощность без учета его энергоэффективности. Температуру измеряли ртутным термометром. Потерю массы исследуемыми образцами оценивали термогравиметрическим методом. Установление фазового состава образцов осуществляли методом рентгенофазового анализа. Запись рентгенограмм проводили с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker (США) с медным анодом ($Cu K_\alpha = 1,5405 \text{ \AA}$). Размер частиц и их распределение по размерам определяли на лазерном микроанализаторе Analysette 22 фирмы FRITZSCH.

Результаты и их обсуждение. При интенсивном смешении компонентов в лабораторном блендере наблюдается заметное отличие в цвете образующихся пастообразных продуктов, полученных с использованием $Al_2(SO_4)_3$, H_3PO_4 , H_3BO_3 . Так, грязно-черный цвет характерен для реакционной смеси, в которую вносили фосфорную и борную кислоты. Грязно-серый цвет характерен и для алюмосодержащих продуктов. При этом независимо от типа добавки pH реакционной смеси составлял порядка 6,0, что обусловлено почти одинаковым содержанием щелочного

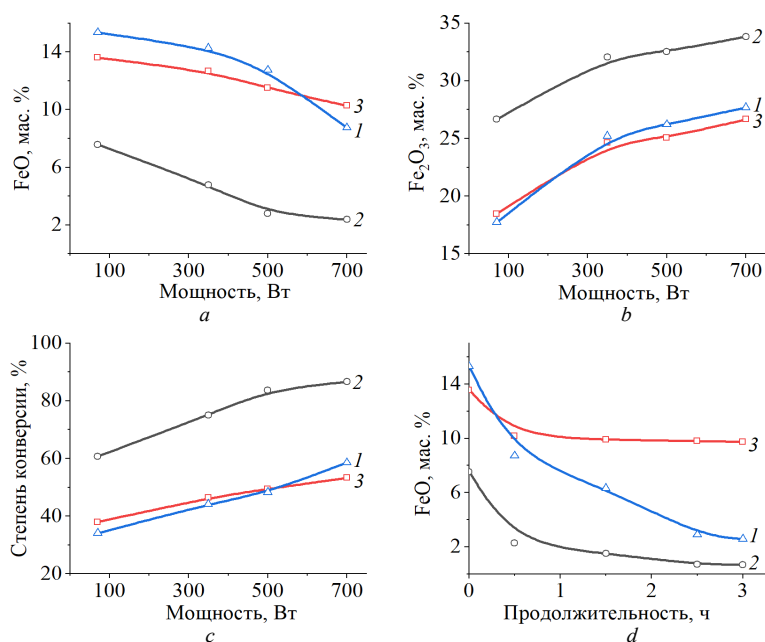


Рис. 1. Зависимость содержания FeO (a), Fe_2O_3 (b), степени конверсии (c) от мощности излучения, содержания FeO от продолжительности микроволновой обработки при 70 Вт (d): 1 – образцы с добавкой H_3PO_4 , 2 – образцы с добавкой $Al_2(SO_4)_3$, 3 – образцы с добавкой H_3BO_3

Fig. 1. Dependence of the content of FeO (a), Fe_2O_3 (b), conversion rate (c) on the radiation power, FeO content on the duration of microwave treatment at 70 W (d): 1 – samples with the addition of H_3PO_4 , 2 – $Al_2(SO_4)_3$, 3 – H_3BO_3

реагента (мела). На рис. 1 представлены данные по изменению содержания Fe (II) и Fe (III) (в пересчете на их оксиды) в исследуемых образцах, а также степени конверсии в зависимости от мощности микроволнового излучения и типа вносимой добавки.

Как видно из рис. 1, несмотря на одинаковые условия окисления (продолжительность обработки 60 мин), содержание соединений Fe (II) и Fe (III) в образцах заметно отличается уже после микроволновой обработки при 70 Вт. Особенно это характерно для образца, полученного с применением сульфата алюминия. Так, содержание FeO, Fe₂O₃ в образце 2 после микроволновой обработки при 70 Вт составляет 7,60 и 27,00 мас.% соответственно (рис. 1, *a, b*), что свидетельствует о высокой степени перехода (порядка 61 %) соединений Fe (II) в соединения Fe (III) (рис. 1, *c*). В то же время образцы 3 и 1 отличаются более высоким содержанием соединений Fe (II) (см. рис. 1, *a*) и низким содержанием Fe (III) (см. рис. 1, *b*). Отмечено также влияние продолжительности микроволновой обработки при 70 Вт на содержание FeO и Fe₂O₃ в исследуемых образцах (рис. 1, *d*). Для образца 3 содержание соединений Fe (II) почти не зависит от продолжительности обработки, в то время как в образце 1 содержание FeO уменьшается до 2,58, а в образце 2 – до 0,70 мас.% (см. рис. 1, *d*).

Повышение мощности излучения при микроволновой обработке образцов сопровождается ростом температуры реакционной массы и резким повышением содержания соединений Fe (III) в образце 2. Для остальных образцов данное изменение менее значимо (см. рис. 1).

Как отмечалось выше, в результате микроволновой обработки образцов при 70 Вт удаляется только свободная вода, так как температура не превышает 80 °С. Повышение температуры до 250–350 °С при увеличении мощности излучения в интервале 350–700 Вт и продолжительности обработки образцов до 3 ч сопровождается удалением до 90 мас.% воды за счет отщепления кристаллизационной H₂O, входящей в состав дигидрата сульфата кальция CaSO₄ · 2H₂O, и дегидратации гидроксоаквакомплексов железа, образующихся в процессе термощелочной конверсии сульфата Fe (II). При этом происходит образование безводного сульфата кальция и метастабильных железосодержащих фаз, состав которых зависит от условий микроволновой обработки и типа вводимой добавки.

Известно [9–11], что при pH ≥ 6 основной окисляемой формой Fe (II) является гидроксид Fe (II), причем процесс окисления, приводящий к образованию анизотропных частиц лепидокрокита γ-FeOOH или гетита α-FeOOH, протекает через образование промежуточных соединений – гидроксосолей Fe (II) – Fe (III) с общей формулой [Fe²⁺_{1-x}Fe³⁺_x(OH)₂]^{x+} · [(x/n)Aⁿ⁻(m/n)H₂O]^{x-} (так называемой зеленой ржавчины, или green rust [10, 12]). При этом на фазовый состав и размер образующихся частиц влияют способ окисления, содержание воды в системе, температура. В работах [13, 14, 15] показана возможность образования и формирования в зависимости от состава реакционной смеси метастабильных легкоокисляемых до оксидов и оксигидроксидов Fe (III) промежуточных комплексных соединений. Исходя из этого и согласно экспериментальным данным можно предположить, что более высокая степень конверсии соединений Fe (II) в присутствии добавки Al₂(SO₄)₃ по сравнению с добавками H₃PO₄, H₃BO₃ обусловлена наличием в системе FeSO₄ – H₂SO₄ – CaCO₃ – M – O₂ (воздух) – H₂O комплексообразующих гидратированных ионов алюминия, влияющих на состав и свойства образующихся смешанных гидроксосолей двух- и трехвалентного железа. Фосфорная и борная кислоты, скорее всего, вступают во взаимодействие с CaCO₃ на стадии их смешения с образованием труднорастворимых солей данных кислот.

Согласно [10] образование промежуточных железосодержащих фаз осуществляется по механизму «растворение – окисление – осаждение», а также путем роста частиц из агрегатов гидроксосолей Fe (II) – Fe (III) в результате твердофазного окисления. Исходя из этого, вероятнее всего, процесс окисления соединений Fe (II) кислородом воздуха, протекающий при микроволновой обработке образцов, носит преимущественно твердофазный характер, скорость которого лимитируется диффузией кислорода к поверхности твердой фазы.

Рентгенофазовый анализ образцов, полученных при микроволновой обработке в течение 3 ч при 700 Вт, показал наличие в них безводного сульфата кальция (*d* – межплоскостное расстояние, Å: 3,5801; 2,9053; 2,3684; 2,2409), а также плохокристаллизованных железосодержащих фаз. На рентгенограммах образцов проявляются гематит (α-Fe₂O₃; *d*, Å: 2,6770; 1,8275; 1,4781; 1,4368), фиброферрит, состав которого FeSO₄(OH)·nH₂O (*d*, Å: 6,9731, 3,3460, 2,9890), лепидокрокит и гетит

(α , γ -FeOОН; d , Å: 6,7070, 2,4761, 1,8821, 1,7550), а такжэ ряд малоинтенсивных пиков, которые, скорее всего, можно отнести к ряду сложных по анионному составу основных солей железа. При этом следует отметить, что наибольшая интенсивность дифракционных максимумов, характерных для фазы гематита, проявляется на рентгенограмме алюминийсодержащего образца 2 (d , Å: 2,6770; 1,8275; 1,4781), наименьшая интенсивность максимумов – на рентгенограмме фосфорсодержащего образца 1. Для борсодержащего образца 3 согласно рентгенофазовому анализу образование гематита при заданных условиях не характерно. Присутствие гематита в продуктах, полученных после микроволновой обработки смеси FeSO₄, CaCO₃, Al₂(SO₄)₃ и H₂O, можно объяснить высокой скоростью окисления промежуточных метастабильных гидроксосолей Fe (II), Fe (III) и формированием α -FeOОН, α -Fe₂O₃, что установлено рентгенографически.

Различный фазовый состав исследуемых образцов обуславливает и отличие их в цвете. Характерно, что образец 2, несмотря на проявление в нем фазы α -Fe₂O₃, имеет светло-желтый цвет, а образец 1 – коричнево-оранжевый с низкой яркостью. Относительно насыщенным желтым цветом обладают образцы 3 и 4 с добавкой H₃BO₃ и без добавок соответственно. Отличие в цветовой гамме данных образцов, видимо, связано с количественным распределением железосодержащих фаз, размером частиц, составом и структурой метастабильных соединений.

Дисперсность железокальцийсодержащих продуктов представлена на рис. 2. Определение размера частиц проводили для образцов, полученных после микроволновой обработки при 700 Вт в течение 3 ч и последующей термообработке при 700 °С в течение 10 мин. Несмотря на многокомпонентность состава исследуемых продуктов, что следует из условий их получения, они преимущественно содержат высокодисперсную фазу с размером частиц 0,1–10,0 мкм. При этом четко прослеживается влияние типа модификатора на размер частиц формирующихся фаз и распределение их по размерам. В фосфорсодержащем образце 1 количество крупных частиц, имеющих размер более 10 мкм, превышает по сравнению с алюминий- и борсодержащими образцами 2 и 3. В то же время в образце 1 отмечается максимальное содержание мелких частиц с размером 0,1–5,0 мкм (\approx 50 %). Алюминий- и борсодержащие образцы 2 и 3 близки по распределению частиц по размерам, хотя и имеются небольшие отличия по содержанию в них мелкой фракции от 0,1 до 0,5 мкм и более крупной от 10,0 до 50,0 мкм. Немодифицированный образец 4 содержит частицы с размером в интервале 0,1–100 мкм, при этом преобладают частицы с размером от 10 до 50 мкм. Для всех образцов характерен четко заметный полидисперсный состав, что может быть связано с особенностями фазообразования в исследуемой многокомпонентной системе.

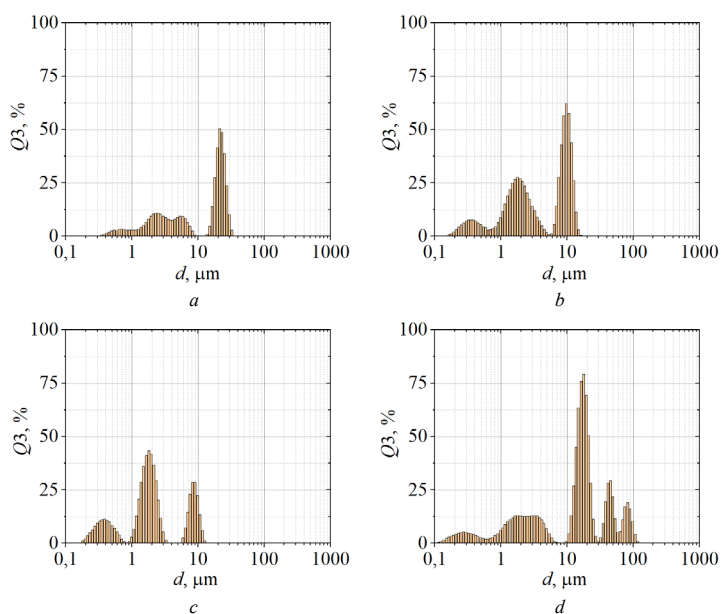


Рис. 2. Гистограмма распределения частиц по размерам термообработанных образцов: *a* – образцы с добавкой H₃PO₄, *b* – образцы с добавкой Al₂(SO₄)₃, *c* – образцы с добавкой H₃BO₃; *d* – без добавки

Fig. 2. Histogram of particle size distribution of heat-treated samples: *a* – samples with the addition of H₃PO₄, *b* – Al₂(SO₄)₃, *c* – H₃BO₃, *d* – without additive

О наличии метастабильных термически неустойчивых фаз в составе образцов 1–3, полученных после микроволновой обработки при 700 Вт, свидетельствуют данные по потере ими массы при термообработке в интервале 600–800 °С. Согласно экспериментальным данным максимальная потеря массы характерна для фосфорсодержащего образца 1 и составляет порядка 4,7 мас.%, для бор- и алюминийсодержащих образцов (3 и 2) – находится на уровне 2,4–2,9 мас.%. Это может быть связано как с термическим разложением промежуточных метастабильных сульфатсодержащих соединений, в частности ферригидрита, так и дегидратацией образующихся солей, например основных фосфатов железа и кальция.

Полученные в системе $\text{FeSO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{CaCO}_3 - M - \text{O}_2(\text{воздух}) - \text{H}_2\text{O}$ с применением микроволновой и последующей термической обработки продукты обладают пигментными свойствами. Несмотря на содержание в составе исследуемых образцов наполнителя – сульфата кальция, доля которого составляет порядка 61 мас.%, они характеризуются насыщенным красно-коричневым цветом, оттенки которого определяются типом добавки. Как показывает визуальная оценка цвета исследуемых образцов, более чистый цвет со светлым оттенком наблюдается для алюминийсодержащего образца, для которого характерна и более высокая кроющая способность (укрывистость находится на уровне 20–23 г/м²) по сравнению с фосфор- и борсодержащими образцами.

Заключение. Изучено влияние неорганических добавок (*M*) в виде $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, H_3PO_4 , H_3BO_3 на процесс и продукты щелочной конверсии, протекающей в системе $\text{FeSO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{CaCO}_3 - M - \text{O}_2(\text{воздух}) - \text{H}_2\text{O}$ при микроволновом воздействии (70–700 Вт) и последующей термообработке (500–750 °С). Установлено, что степень конверсии соединений Fe (II) при введении в реакционную смесь сульфата алюминия в 1,5–2,0 раза выше по сравнению с H_3PO_4 , H_3BO_3 и достигает 80 % уже на стадии микроволновой обработки при 500 Вт. Показано, что полученные в присутствии добавок при 700 °С железокальцийсодержащие продукты содержат преимущественно высокодисперсную фазу с размером частиц 0,1–10,0 мкм, характеризуются насыщенным красно-коричневым цветом, оттенки которого зависят от химического состава вводимой добавки. Более чистым ярким цветом со светлым оттенком обладает алюминийсодержащий пигмент-наполнитель.

Список использованных источников

1. Pfaff, G. Inorganic pigments / G. Pfaff. – 2nd, Revised and Extended Edition. – Walter de Gruyter GmbH, 2023. – 389 p. <https://doi.org/10.1515/9783110743920>
2. Faivre, D. Iron oxides: from nature to applications / D. Faivre. – Wiley-VCH Verlag GmbH, 2016. – 598 p. <https://doi.org/10.1002/9783527691395>
3. Получение пигментного материала в системе $\text{FeSO}_4 - \text{CaO} - \text{H}_2\text{O}$ для окрашивания силикатного кирпича / Л. С. Ещенко, А. А. Мечай, Д. М. Новик, К. В. Бородина // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2018. – № 2 (211). – С. 113–117.
4. Влияние состава пигментных материалов на декоративные и физико-механические свойства силикатного кирпича / Е. И. Барановская, Л. С. Ещенко, А. А. Мечай [и др.] // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2021. – № 1 (241). – С. 120–125.
5. Ещенко, Л. С. Получение железокальцийсодержащего пигментного материала с использованием микроволнового излучения / Л. С. Ещенко, В. С. Блинов // Инновационные технологии в обеспечении качества и безопасности химических и пищевых продуктов: сб. тез. Междунар. науч.-техн. конф., Ташкент, 24–25 сент. 2021 г. – Ташкент, 2021. – С. 266–267.
6. Ещенко, Л. С. Влияние условий термощелочной конверсии сульфата железа (II) на состав и свойства образующихся продуктов / Л. С. Ещенко, Д. М. Новик, К. В. Бородина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2018. – № 3. – С. 79–91. <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2018.3.07>
7. Mikhailov, M. M. Effect of Al_2O_3 nanoparticle modification on increase in reflectivity of BaSO_4 pigment / M. M. Mikhailov, A. N. Sokolovskiy, S. A. Yuryev // Materials Chemistry and Physics. – Vol. 260. – P. 124099. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124099>
8. Zheng, S. Surface-modification of fine red iron oxide pigment / S. Zheng, Q. Zhang // China Particuology. – 2003. – Vol. 1, № 4. – С. 176–180. [https://doi.org/10.1016/s1672-2515\(07\)60137-7](https://doi.org/10.1016/s1672-2515(07)60137-7)
9. Шабанова, Н. А. Химия и технология нанодисперсных оксидов: учеб. пособие / Н. А. Шабанова, В. В. Попов, П. Д. Саркисов. – М.: Академкнига, 2006. – 309 с.
10. Попов, В. В. Закономерности образования нанокристаллических частиц оксигидроксидов железа (III) при окислении соединений железа (II) в нейтральной среде / В. В. Попов, А. И. Горбунов, Е. Ф. Левина // Журнал неорганической химии. – 2010. – Т. 55, № 7. – С. 1063–1069.
11. Попов, В. В. Закономерности образования нанокристаллических оксидов и оксигидроксидов железа (III) при окислении соединений железа (II) в щелочной среде / В. В. Попов, А. И. Горбунов // Журнал неорганической химии. – 2010. – Т. 55, № 10. – С. 1159–1603.

12. Cornell, R. M. Iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses / R. M. Cornell, U. Schwertmann. – Germany: John Wiley & Sons, 2003. – 664 p. <https://doi.org/10.1002/3527602097>
13. Fe (II)-induced transformations ferrihydrite to lepidocrocite and goethite / H. Liu, P. Li, M. Zhu [et al.] // *Journal of Solid State*. – 2007. – Vol. 180. – P. 2121–2128. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.03.022>
14. Cudennec, Y. Study of the formation processes of iron oxy-hydroxides; hypotheses of topotactic transformations / Y. Cudennec, A. Lecerf // *Comptes Rendus Chimie*. – 2003. – Vol. 6. – P. 437–444. [https://doi.org/10.1016/s1631-0748\(03\)00069-9](https://doi.org/10.1016/s1631-0748(03)00069-9)
15. Effect of solution and solid-phase conditions on the Fe (II)-accelerated transformation of ferrihydrite to lepidocrocite and goethite / D. D. Boland, R. N. Collins, C. J. Miller [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2014. – T. 48, № 10. – С. 5477–5485. <https://doi.org/10.1021/es4043275>

References

1. Pfaff G. *Inorganic pigments*. 2nd Ed. Walter de Gruyter GmbH, 2023. 389 p. <https://doi.org/10.1515/9783110743920>
2. Faivre D. *Iron oxides: from nature to applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2016. 598 p. <https://doi.org/10.1002/9783527691395>
3. Eshchenko L. S., Mechay A. A., Novik D. M., Borodina K. V. Preparation of pigment material in the system FeSO₄ – CaO – H₂O for coloring sand-lime brick. *Trudy BGTU. Seriya 2: Himicheskie tehnologii, biotekhnologiya, geoekologiya = Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technologies, Biotechnology, Geoecology*, 2018, no. 2 (211), pp. 113–117 (in Russian).
4. Baranovskaya Ye. I., Eshchenko L. S., Mechay A. A., Vorontsov R. A., Cheburakhina M. V. Influence of pigment materials composition on decorative, physical and mechanical properties of silicate brick. *Trudy BGTU. Seriya 2: Himicheskie tehnologii, biotekhnologiya, geoekologiya = Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 1 (241), pp. 120–125 (in Russian).
5. Eshchenko L. S., Blinov V. S. Obtaining iron-calcium-containing pigment material using microwave radiation. *Innovatsionnye tehnologii v obespechenii kachestva i bezopasnosti khimicheskikh i pishchevykh produktov: sb. tez. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Tashkent, 24–25 sent. 2021 g.* [Innovative technologies in ensuring the quality and safety of chemical and food products. Collection of abstracts of the international scientific-technical conferences]. Tashkent, 2021, pp. 266–267 (in Russian).
6. Eshchenko L. S., Novik D. M., Borodina K. V. The effect of thermal-alkaline conversion of iron sulfate (ii) on the composition and properties of the products being generated. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology*, 2018, no. 3, pp. 79–91 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2018.3.07>
7. Mikhailov M. M., Sokolovskiy A. N., Yuryev S. A. Effect of Al₂O₃ nanoparticle modification on increase in reflectivity of BaSO₄ pigment. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, vol. 260, pp. 124099. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124099>
8. Zheng S., Zhang Q. Surface-modification of fine red iron oxide pigment. *China Particuology*, 2003, vol. 1, no. 4, pp. 176–180. [https://doi.org/10.1016/s1672-2515\(07\)60137-7](https://doi.org/10.1016/s1672-2515(07)60137-7)
9. Shabanova N. A., Popov V. V., Sarkisov P. D. *Chemistry and technology of nanodispersed oxides*. Moscow: Akademkniga Publ., 2006. 309 p. (in Russian).
10. Popov V. V., Gorbunov A. I., Levina E. F. Regularities of the formation of iron (III) nanocrystalline particles during the oxidation of iron (II) compounds in a neutral medium. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2010, vol. 55, no. 7, pp. 995–1001 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0036023610070028>
11. Popov V. V., Gorbunov A. I. Regularities of formation of iron (III) nanocrystalline oxides and oxyhydroxides during oxidation of iron (II) compounds in an alkaline medium. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2010, vol. 55, no. 10, pp. 1508–1514 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0036023610100037>
12. Cornell R. M., Schwertmann U. *Iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses*. Germany, John Wiley & Sons, 2003. 664 p. <https://doi.org/10.1002/3527602097>
13. Liu H., Li P., Zhu M., Wei Yu, Sun Yu. Fe (II)-induced transformations ferrihydrite to lepidocrocite and goethite. *Journal of Solid State*, 2007, vol. 180, pp. 2121–2128. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.03.022>
14. Cudennec Y., Lecerf A. Study of the formation processes of iron oxy-hydroxides; hypotheses of topotactic transformations. *Comptes Rendus Chimie*, 2003, vol. 6, pp. 437–444. [https://doi.org/10.1016/s1631-0748\(03\)00069-9](https://doi.org/10.1016/s1631-0748(03)00069-9)
15. Boland D. D., Collins R. N., Miller Ch. J., Glover Ch. J., Waite T. D. Effect of solution and solid-phase conditions on the Fe (II)-accelerated transformation of ferrihydrite to lepidocrocite and goethite. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48, no. 10, pp. 5477–5485. <https://doi.org/10.1021/es4043275>

Информация об авторах

Ещенко Людмила Семеновна – доктор технических наук, профессор кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yeshchanko@belstu.by

Воронцов Роман Александрович – магистр, ведущий инженер. ОАО «Белгорхимпром» (ул. Киселева, 26А, 220029, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rvorontsov97@gmail.com

Блинов Валерий Сергеевич – инженер-технолог, ООО «Компания БКМ» (223710, здание ИООО «АйкхоффБел», ст. «Калий-1», Солигорский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: valeriusblinus@gmail.com

Information about the author

Eshchenko Lyudmila S. – D. Sc. (Engineering), Professor of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yeshchanko@belstu.by

Vorontsov Roman A. – M. Sc., Lead Engineer. OJSC «Belgorkhimprom» (26A, Kiselev Str., 220029, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rvorontsov97@gmail.com

Blinov Valery S. – Process Engineer, LLC «Company BKM» (223710, Building of IOOO «Eickhoffbel», Station «Kali-1», Soligorsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: valeriusblinus@gmail.com