

**ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА
ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И ПОЛУЧЕНИЕ
НА ИХ ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗООКСИДНЫХ ПИГМЕНТОВ
ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ**

taga307@yandex.ru

**Тарасова Г.И., д-р техн. наук, доц.,
Свергузова С.В., д-р техн. наук, проф.,
Старостина И.В., канд. техн. наук, доц.,
Уральский В.И., канд. техн. наук, доц.,
Севостьянов М.В., канд. техн. наук, доц.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Установлены особенности вещественного состава лежалых хвостов обогащения железистых кварцитов хвостохранилищ действующих ГОКов. Показано, что содержание оксидов железа в исходных ХОЖК, существенно влияют на цвет и свойства полученных пигментов после термообработки. Чем меньше содержание оксидов железа (FeO и Fe_2O_3), тем светлее тон полученных пигментов и ниже качественные показатели масляных красок на их основе. Теоретически разработаны для процессов диспергирования: математическая модель движения дисперсной фазы в цилиндрической камере; математическая модель движения дисперсной фазы в торообразной камере; математическая модель пылеосаждения на последней стадии сепарации.

Ключевые слова: хвостохранилища ГОК, ХОЖК, термообработка, железоксидные пигменты-наполнители, диспергирование.

Понятие «техногенное месторождение» было сформулировано еще В.И. Вернадским, которое подразумевало скопление вторичных минеральных ресурсов, образовавшихся в результате складирования отходов производства и пригодное для разработки и производства товарной продукции. Поэтому вопрос переработки и утилизации, создание высокопроизводительных технологических схем переработки хвостов обогащения железистых кварцитов хвостохранилищ ГОКов в настоящее время остается актуальным.

Объектами исследования являются отходы горнообогатительных предприятий месторождений - хвосты обогащения железистых

кварцитов (ХОЖК) хвостохранилищ Лебединского и Стойленского ГОКов КМА. На сегодняшний день хвостохранилища Лебединского ГОК занимают площадь 1400 га, Стойленского ГОК – 880 га, здесь сосредоточено около 600 млн т металлосодержащих отходов (МСО) в виде хвостов обогащения железистых кварцитов (ХОЖК). Возможность переработки этих отходов в товары народного потребления, пигменты-наполнители в силикатные и масляные краски, цветной строительный кирпич, цветную тротуарную плитку и другое может обеспечить значительное расширение минеральной базы РФ; увеличить выпуск товаров народного потребления; снизить долю капитальных вложений в освоение новых месторождений; сэкономить затраты на складирование, содержание хвостохранищ, рекультивацию земель; экологическую безопасность регионов.

В современных условиях в связи с ростом потребления продукции минерально-сырьевого комплекса происходит истощение крупных запасов полезного ископаемого, ухудшается состояние окружающей среды и возникает настоятельная необходимость вовлечения в разработку техногенных месторождений. Техногенные месторождения становятся все более важными источниками различных видов минерального сырья. Накопление отходов горно-металлургического производства в техногенных объектах осуществляется непрерывно. Суммарное содержание компонентов оксидов железа и кремния, накапливающихся за 20 - 30 лет на техногенных объектах сопоставимо, а иногда превышает их количество в ежегодно добываемых рудах. Это является еще и важным резервом для развития ресурсосбережения, охраны недр, рационального землепользования, экономической целесообразности и защиты окружающей среды.

Изучение вещественного состава хвостов обогащения железистых кварцитов проводилось на пробах, отобранных из хвостохранилищ действующих ГОКов КМА. Содержание кремнезема на Стойленском (СГОК) и Лебединском (ЛГОК) хвостохранилищах колеблется от 47,50% до 75,08%. Основная часть кремнезема связана с кварцем и лишь небольшое количество его входит в состав силикатов. Наибольшее количество кремнезема содержится в хвостах СГОКа (до 75,08%). Оксиды железа слагают рудные минералы - магнетит и гематит и в небольшом количестве содержатся в силикатах. Соотношение их в хвостах обогащения различно. По содержанию FeO высокие значения имеют хвосты ЛГОКа (6,26-10,71%), несколько меньше это содержание у хвостов СГОКа (5,04 - 7,03%). Глинозем Al_2O_3 , входящий в состав слюд, полевых шпатов, амфиболов в хвостах обогащения ЛГОКа и СГОКа, содержится примерно в одинаковых количествах (от 1,84% до 3,6%). Остальные компоненты – CaO, MgO преобладают в хвостах

ЛГОКа (1,77-3,60%). Содержание Na_2O и K_2O на всех хвостохранилищах колеблется на одном уровне.

Закономерности изменения содержания компонентов обусловлены гравитационной дифференциацией и близки для Лебединского и Стойленского хвостохранилищ - вблизи выпуска пульпы концентрируются минералы, содержащие железо (магнетит, гематит), а на удалении от выпуска повышается содержание SiO_2 (чистый кварц без сростков), CaO , MgO , K_2O , Na_2O (силикаты, амфиболы, карбонаты). Отмечено также вблизи выпуска повышенное содержание серы за счет накопления пирита. Проведенные минералого-петрографические исследования шлифов и аншлифов ХОЖК в проходящем и отраженном свете на микроскопе «Мин-8», аншлиф – на микроскопе «Эпиквант» (рис. 1, 2, 3) показали, что размер зерен колеблется от 5 до 0,05мм. Крупнозернистые фракции 5-2,5 мм представлены обломками железистых кварцитов амфиболо-кварцевого состава с вкрапленным магнетитом (рис. 6.1), мелкие фракции представлены отдельными минералами. Основными рудными минералами, слагающими ХОЖК, являются: магнетит, гематит, нерудными – $\alpha\text{-SiO}_2$ (кварц), слюда, карбонаты, полевые шпаты и др. Из аксессуарных материалов встречаются: ильменит (FeTiO_3), рутил (TiO_2), апатит ($[\text{Ca}_5\text{X}(\text{PO}_4)_3]$), где $\text{X}=\text{F,Cl,OH}$.

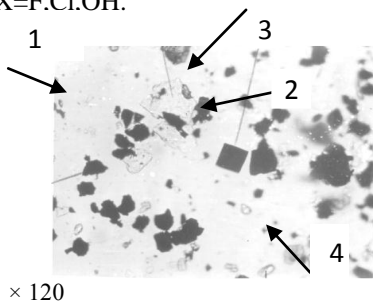


Рисунок 1 – «Лежалые» хвосты обогащения СГОКа: 1 - черные изометрические частицы магнетита; 2 - квадратные частицы пирита; 3 - прозрачные пластинчатые частицы слюды с вкраплениями магнетита; 4 - изометрические прозрачные частицы кварца с вкраплениями магнетита

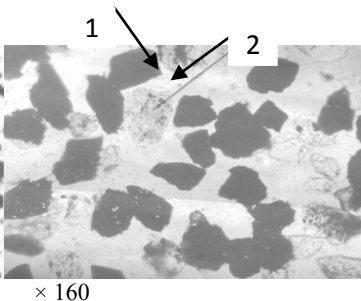
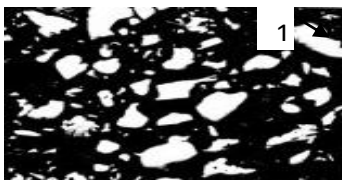


Рисунок 2 – Морфологические особенности частиц магнетита и кварца: 1 - магнетит; 2 - кварц с вкраплениями магнетита



x 100 (аншлиф) Рисунок 3 – Магнетит (1) в отходах ХОЖК СГОКа

Кварц наблюдается в виде обломков остроугольной неправильной формы с вкрапленным магнетитом, в более мелких фракциях представлен округлой формой, практически без включений рудных минералов. Магнетит, основной минерал, представлен в виде вкраплений в кварцевых зернах (рис.2), в силикатах, реже отдельными тонкими прослойками в обломках железистых кварцитов. С уменьшением размера фракции возрастает количество свободного магнетита правильной, изометрической формы кристаллов. В тонких фракциях повышается концентрация высокодисперсного гематита (Fe_2O_3) и магнетита. Таким образом, по химическому составу ХОЖК можно отнести к кварцсодержащим отходам с примесями оксидов железа, которые можно использовать для получения пигментов-наполнителей на кварцевой основе, согласно Ходакову Г.С. Визуально, отходы обогащения представляют разнoзернистый материал темно-серого цвета.

Размер зерен колеблется от 5 мм до - 0,05 мм. Как указывалось выше, состав хвостов обусловлен минеральным составом исходной руды, особенностями технологического процесса и характером дифференциаций материала в процессе заполнения хвостохранилища.

Крупнозернистые фракции +5, +2,5 мм представлены обломками железистых кварцитов амфиболо-кварцевого состава с вкрапленным магнетитом. Мелкие фракции представлены отдельными минералами. Основными рудными минералами являются магнетит, гематит, нерудными - кварц, амфиболы, слюда, карбонаты, полевые шпаты. Из аксессуарных минералов встречаются ильменит, рутил, апатит. Основным минералом, слагающим хвосты обогащения, является кварц, содержание его в пробах колеблется от 35,0 % (ХВМ-3) до 58,4% (ХВЛ-2), исключение составляет проба ХВС-3, где содержание кварца низкое - 27,3%, Кварц наблюдается в виде обломков остроугольной, неправильной формы с вкрапленным магнетитом (рис. 2), в более мелких фракциях кварц округлой формы, практически без включений рудных минералов. Магнетит - основной рудный минерал, представлен в виде вкрапленности в кварцевых зернах, в силикатах, реже отдельными тонкими прослоями в обломках железистых кварцитов (рис. 1.2). Кварцевые зерна с крапленным магнетитом, с уменьшением размера фракций возрастает количество свободного магнетита. Форма кристаллов правильная, изометричная (рис. 3). Гематит представлен в виде двух разновидностей: в виде тонкодисперсных включений в кварце и в виде мелких чешуек таблитчатой формы. Для Лебединского и Стойленского месторождений характерна слюда биотит -

флогопитового вида, в крупных фракциях представлена агрегатами черного цвета, в мелких фракциях в виде отдельных пластинок округлой или таблитчатой удлиненной формы коричневого цвета, редко отмечается в биотите вкрапленность магнетита.

Карбонаты встречаются в виде двух минералов. Железистый сидерит, желто-бурого цвета с вкрапленностью рудных, и доломит, белого цвета с перламутровым блеском, форма кристаллов неправильная, чаще округлая. Пирит золотисто-желтого цвета, форма зерен неправильная, содержание его достигает 0,5%. В виде единичных акцессорных минералов встречается апатит, ильменит, рутил.

Характерно соотношение рудных минералов: для хвостов ЛГОКа типично наибольшее содержание магнетита при низком гематите, для СГОКа магнетита в хвостах содержится несколько меньше (2,9 - 5,2%), однако с выпуском отмечается значительная концентрация магнетита (2,1 - 3,3%) и максимальная гематита (35,0 - 53,5%). В связи с тем, что пробы на хвостохранилищах отбирались на разном удалении от выпусков, гранулометрический состав их для одного и того же хвостохранилища значительно различается.

Распределение минералов в хвостохранилище подчинено принципам гравитационной дифференциации материала, моделью которого может служить осадкообразование в движущемся потоке пульпы. В дальнейшем производился ряд лабораторных испытаний на обогатимость лежалых хвостов СГОКа. В табл. 1 представлены результаты анализа хвостов СГОКа.

Таблица 1 – Минеральный состав ХОЖК

Fe общ, %	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P	CaO	MgO
10,24	3,39	6,4	71,27	1,83	0,146	0,15	3,07	3,11
MnO	TiO ₂	плотность хвостов в естественном состоянии, кг/м ³		Высушенные: объемный вес скелета, кг/м ³		Влажность, %		Кoeffициент фильтрации, м/сут
0,091	0,101	2740		1600		9,5		1,1

Гранулометрический состав хвостов по створам приведен в табл.2. С удалением от места выпуска пульпы и с глубиной отбора наблюдается увеличение количества мелких фракций (0,1-0,045 мм).

Таблица 2 – Средние значения фракционного состава хвостов по поперечникам плотины распределения по мере удаления от зоны намыва

Метры	Гранулометрический состав по поперечникам в, мас. %							Средне взвеш., d, мм
	0,8	0,4	0,2	0,1	0,071	0,045	менее	
+20	4,6	27,4	35,2	8,93	12,2	2,1	9,57	0,334
+40	2,3	18,3	35,1	12,3	16,6	3,0	12,4	0,271
+60	3,4	15,5	31,3	13,4	19,4	4,4	12,6	0,256
+80	3,8	21,2	34,0	11,1	15,7	1,96	12,24	0,294
+100	2,4	8,6	28,2	18,2	23,8	3,53	15,27	0,208
+200	2,7	11,6	30,8	16,5	20,4	2,9	15,0	0,231

Установлено, что в составе отходов в наибольшем количестве присутствуют фракции размером частиц 0,14-0,1мм. В табл. 3 представлены физико-химические свойства ХОЖК.

Таблица 3 – Физико-химические свойства отходов ХОЖК

Объект	$S_{уд}, м^2/кг$	Насыпная плотность, $кг/м^3$	Истинная плотность, $кг/м^3$
СГОК	301,3	1209	2740
ЛГОК	332,1	1260	2850

Для проведения разнообразных технологических процессов немаловажными являются сведения о размерах взаимодействующих частиц. Этот показатель особенно важен в производстве лакокрасочных материалов, так как качество краски, равномерность покрытия и гладкость поверхности во многом зависят от размера частиц пигмента-наполнителя. Результаты седиментационного анализа отходов ХОЖК СГОК и ЛГОК (табл.4), показали, что размеры основной массы частиц находятся в интервале 20-60 мкм, что характеризует данный материал как имеющий высокую степень монодисперсности.

Согласно нормативным документам, диаметр частиц материала, используемого в качестве пигмента-наполнителя, должны находиться в пределах 20-70 мкм; таким образом, по этому показателю предлагаемый нами материал соответствует требованиям, предъявляемым к пигментам (табл.4). Содержание частиц более 70 мкм незначительное, поэтому для повышения дисперсности частиц отходов ХОЖК можно использоваться измельчение в мельницах мокрого помола в течение непродолжительного времени (5-10 мин).

Таблица 4 – Содержание частиц по фракциям в отходах ХОЖК, %

ХОЖК	Более 60 мкм	60-40 мкм	40-20 мкм	20-10 мкм	Менее 10 мкм
ЛГОК	20	35	36	15	5
СГОК	15	20	40	20	12

Данные дисперсионного анализа (рис. 4) показали, что отходы СГОКа содержат большее количество частиц диаметром до 10 мкм, поэтому в дальнейшей работе использовали отходы СГОКа, химический состав которых представлен в табл. 1.

По результатам ДТА для исследованного образца ХОЖК определены: 5 эндотермических эффектов: при 170 °С – потеря гигроскопической влаги; при 580 °С, 680 °С, 715 °С и 810 °С, что сопровождается значительной потерей массы – процесс разложения $MgCO_3$ и $CaCO_3$, соответственно, эндоэффект при 580 °С характерен для обратимого полиморфного превращения кварца из α - в β -модификацию; и 2 экзотермических эффекта: при 470 °С – переход γ - Fe_2O_3 в α - Fe_2O_3 и 650 °С, что сопровождается небольшим увеличением массы – переход Fe_3O_4 в α - Fe_2O_3 (рис.5).

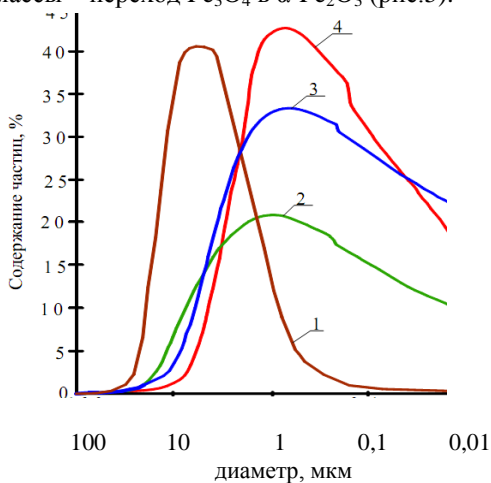


Рисунок 4 – Результаты седиментационного анализа отходов ХОЖК: 1, 2 - Стойленского ГОКа; 3, 4 - Лебединского ГОКа

Наличие экзотермических эффектов на ДТА при температурах 800 °С и 950 °С характеризует присутствие остаточного количества магнетита.

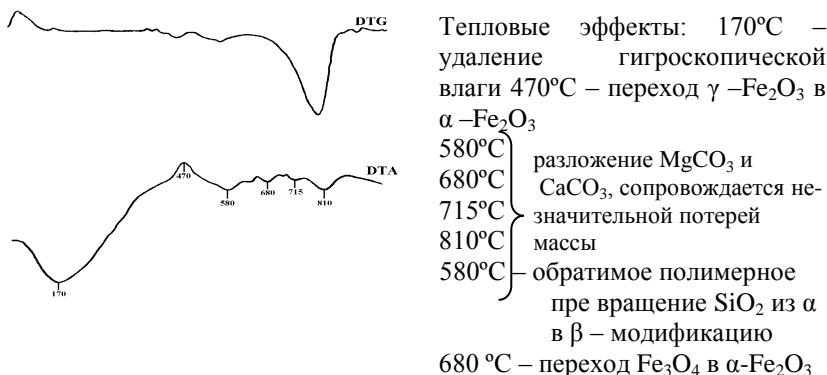


Рисунок 5 – Результаты ДТА исходного ХОЖК СГОКа

По данным РФА минералогический состав ХОЖК представлен SiO_2 , о чем свидетельствует наличие соответствующих дифракционных максимумов $d(\text{Å})= 4,281; 3,357; 2,287; 2,241; 2,132; 1,983; 1,822; 1,674$, Fe_3O_4 $d(\text{Å})= 2,95; 2,542; 2,092; 1,701$, α - Fe_2O_3 $d(\text{Å})= 2,698; 2,542; 2,209; 1,857$. Присутствие в качестве примеси кальцита подтверждается наличием соответствующих максимумов с достаточной интенсивностью $d(\text{Å})= 3,909; 3,074; 2,505; 2,341; 1,951; 1,882$ (рис. 6 а). При термообработке происходит постадийное окисление магнетита Fe_3O_4 с образованием α - Fe_2O_3 , общее количество которого увеличивается, на что указывает повышение интенсивности соответствующих максимумов на РФА $d(\text{Å})= 2,71; 2,532$ и изменение окраски материала от серого до терракотового. Это сопровождается снижением интенсивности максимумов, характерных для Fe_3O_4 $d(\text{Å})= 2,954$ (рис. 6 б). При термообработке происходит также разложение кальцита, на что указывает снижение (исчезновение) интенсивности соответствующих максимумов $d(\text{Å})= 3,074; 2,505; 2,341; 1,951; 1,882$ (рис. 6 б).

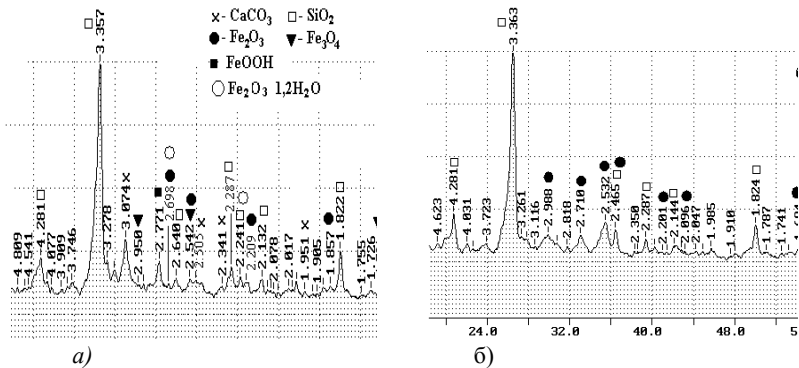


Рисунок 6 - РФА отходов ХОЖК Стойленского ГОКа:

a – исходные; *б* – термообработанные при температуре 1000 °С.

Результаты электронно-микроскопических исследований (рис. 7) показали, что образец отходов ХОЖК состоит из пылевидных частиц с размерами от 5 до 30 мкм и их агрегатов, достигающих 100 и более мкм, выраженная пористость частиц не выявлена.

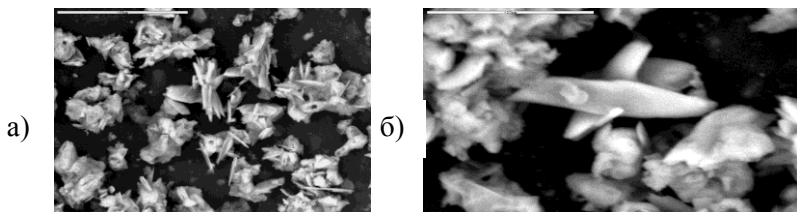


Рисунок 7 – Образцы отходов ХОЖК СГОК при увеличении в 500 (*a*) и 2000 (*б*) раз

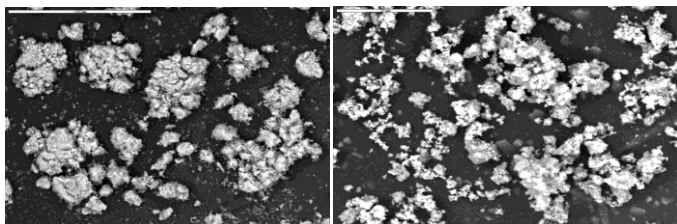


Рисунок 7 (в, г) – Образцы отходов ХОЖК СГОК при увеличении в 500 (*в*) и 2000 (*г*) раз после диспергирования и термообработки

Предлагаемый нами способ получения пигментов-наполнителей из отходов ХОЖК осуществляется по упрощенной схеме: *термообработка – помол*.

Технологический процесс исключает предварительное измельчение, повторную термообработку, проведение сложных технологических приемов и применение дорогих и дефицитных материалов. При этом не образуются вторичные отходы в виде сточных вод и отходящих газов. Полученные пигменты в зависимости от состава шихты и температуры обжига имеют различную цветовую гамму. Установлено, что температура обжига оказывает существенное влияние на цвет пигмента: при 900 °С он кирпично-оранжевый, а при 1000 °С окраска становится более интенсивной и приобретает красновато-кирпичневый цвет.

Пигменты-наполнители, полученные из ХОЖК предполагается использовать для получения целого ряда продукции, включая объемно-окрашенные силикатные бетоны автоклавного твердения. Одной из важных характеристик пигментов, используемых для получения окрашенных силикатных материалов автоклавного твердения, является их красящая способность, оценку которой осуществляют в каждом отдельном случае для конкретных сырьевых материалов, так как их цвет играет значительную роль в конечной окраске готовой продукции. Проведено комплексное исследование влияния технологических параметров получения железоксидных пигментов-наполнителей на их красящую способность с использованием трехфакторного эксперимента путем получения полных квадратичных зависимостей. Изменяющимися технологическими параметрами являлись: температура термообработки (x_1), длительность термообработки (x_2), массовая доля кальцинированной соды (Na_2CO_3) (x_3), в качестве отклика использовали красящую способность (y). Интервалы варьирования независимых факторов определялись на основании предварительных экспериментов. В качестве отклика рассматривали красящую способность, которую определяли путем разбеливания известью [Книгина Г.И., Факторович Л.С. Окрашивание известково-песчаных масс и активность минеральных пигментов. – Сб. докладов на XXVI конференции НИСИ. Новосибирск, 1969; Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. – М.: Стройиздат, 1982. – 384 с.]. Условия планирования эксперимента представлены в табл. 5.

Таблица 5 - Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Температура обжига, °С	x_1	950	1030	1110	80
Длительность обжига, час.	x_2	2	3	4	1
Содержание Na_2CO_3 , % от массы ХОЖК	x_3	0	1	2	1

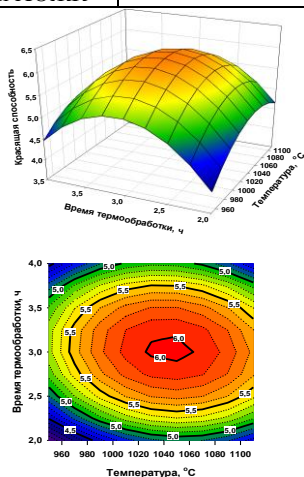


Рисунок 8 – Номограмма

эффективно им управлять. При использовании номограммы можно поддерживать на заданном уровне выходной параметр, изменяя соответствующим образом факторы, входящие в уравнение регрессии.

Установлены и скорректированы оптимальные условия термической и физико-химической модификации ХОЖК: температура обжига – 1030°С; длительность термообработки – 3 час.; добавка Na_2CO_3 – 1%; при условии термоудара.

При разработке теоретических основ постадийного измельчения материалов важное место занимает математическое описание кинетики процесса измельчения, которая характеризует скорость процесса измельчения. Математическое описание кинетики процесса измельчения основано на описании изменения во времени одного из

Уравнение регрессии, адекватно описывающие процесс получения пигмента – наполнителя основе ХОЖК с улучшенными показателями красящей способности имеет вид: $y = 6,02 + 0,2x_1 + 0,1x_2 + 0,3x_3 - 0,125x_1x_2 + 0,125x_1x_3 + 0,125x_2x_3 - 0,55x_1^2 - 1,05x_2^2 - 0,05x_3^2$.

Комплексное представление о влиянии изучаемых технологических параметров на красящую способность получаемых пигментов-наполнителей получили, построив номограмму (рис. 8), которая позволяет оптимизировать технологический процесс и эффективно

показателей дисперсности по аналогии с формальными химическими реакциями. Данный подход позволил рассмотреть процесс измельчения материалов по отдельным стадиям, определить рациональные условия их измельчения во всем интервале изменения дисперсности, а также подтвердил возможность организации различных технологических схем помола.

Была разработана технологическая линия для производства высокодисперсных материалов (рис.9).

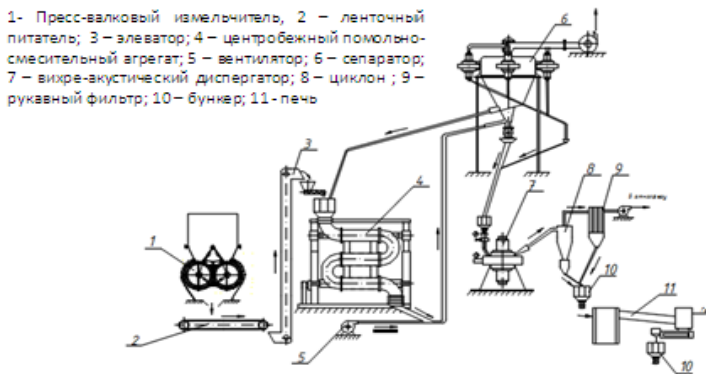


Рисунок 9 – Технологическая линия для производства высокодисперсных материалов

Математическая модель динамики частицы, с учетом сил, действующих на частицу, дала возможность получить радиальную и трансверсальную компоненты вектора скорости частицы и исследовать движение частицы в камере вихре-акустического диспергатора. Радиальная скорость частиц материалов при движении в воздушном потоке в любом месте камеры помола равна:

$$u_r^2 = \left(\int \frac{2e^{2Ar} \left(Er^{k+1} + Fr \frac{2k-1}{k+1} + Cr \right)}{r} dr + C_1 \right) e^{-2Ar}.$$

$$\text{где } A = c_X \frac{\rho \pi d^2}{2 \cdot 4m}, C = \frac{11}{18m} \pi R_p^2 (k R_p^4) \rho v_0^2 \sin \theta, E = \frac{V_{\varphi \max}}{R_c^{k-1}},$$

$$F = \frac{\rho}{m} \frac{V_{\varphi \max}}{R_c^{k-1}} \Gamma. \text{ Окружная скорость частицы в потоке воздуха}$$

находится из уравнения:

$$\frac{du_{\varphi}}{dr} = \left(c_X \frac{\rho \pi d^2}{2 \cdot 4m} |V_{\varphi} - u_{\varphi}| (V_{\varphi} - u_{\varphi}) + \frac{11}{18m} \pi R_p^2 (k R_p^4) \rho v_0^2 \cos \theta \right) u_r^{-1}.$$

Для получения расчетных характеристик центробежного аппарата необходимо описать происходящие в нем процессы, т.е. построить математическую модель процессов центробежной сепарации. Поле скоростей закрученного газового потока в цилиндрической камере представляется системой уравнений:

$$\begin{aligned} W_r \cdot \frac{W_{\varphi}}{\partial z} + W_z \cdot \frac{W_{\varphi}}{\partial z} + \frac{W_{\varphi} \cdot W_r}{r} &= -\frac{\partial}{\partial r} (W_r * W_{\varphi}) - \frac{2(W_r * W_{\varphi})}{r} \\ \frac{\partial W_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (W_r \cdot r) &= 0 \\ W_{\varphi} &= \frac{C}{r^k} \end{aligned}$$

где $W = \{W_{\varphi}, W_r, W_z\}$ - пульсационная скорость газа, W_{φ} - тангенциальная, W_r - радиальная, W_z - осевая составляющие скорости, С - постоянная, определяемая экспериментально, k - показатель степени, r, φ , z - цилиндрические координаты.

При построении детерминированной математической модели процесса сепарации в центробежных сепараторах применялся комбинированный подход, соединяющий в себе рассмотрение: а) гравитационной составляющей и размера осаждаемой частицы (кольцевой канал циклона; гравитационный классификатор) и б) метода "равновесных" окружностей, при рассмотрении которого пренебрегают гравитационной составляющей движения частицы, по сравнению с центробежной (центробежный классификатор, камера циклона). Уравнение движения частицы в цилиндрической камере сепаратора описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d\vec{V}}{dt} + C_j S \frac{\rho U |U|}{2} + m\vec{g} = 0 \\ \alpha^+ = \arctg \left[\operatorname{tg} \alpha^- - \frac{f(k_y + 1)}{k_y} \right] , \\ \vec{V}(t=0) = \vec{V}_0, \quad r(t=0) = r_0 \end{array} \right. ,$$

где m - масса частицы, \vec{V} - вектор скорости частицы, коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, S - площадь поперечного (Миделева) сечения частицы, ρ - плотность газа, $U=V-W$ относительная скорость обтекания частицы газовым потоком (W - поле скоростей несущего газа), α^+ , α^- - углы между вектором скорости частицы и нормалью к поверхности, проведенной в точке соударения частицы со стенкой аппарата. f -коэффициент трения частицы о поверхность, k_y -коэффициент восстановления скорости частицы при нормальном ударе

Для исследования характера движения дисперсной фазы в торообразном осадителе применялась модель плоского спирального сепаратора. Компоненты вектора скорости газа в торообразном осадителе определяются следующими уравнениями:

$$W_\phi = \omega_1 \cdot r, \quad W_r = -\omega_2 \cdot z, \quad W_z = \omega_2 (r - r_1)$$

где ω_1 - угловая скорость газозвдушного потока, ω_2 - меридиональная угловая скорость, r - текущий радиус произвольной точки неподвижной системы координат.

Движение дисперсной фазы в торообразном осадителе моделируется при помощи уравнения:

$$\frac{d(m\vec{V})}{dt} = \vec{F}, \quad \text{где } \vec{F} \text{ - силы, действующие на твердую фазу. На}$$

движение дисперсной фазы существенное влияние оказывают следующие факторы:

1. Полидисперсность классифицируемых материалов. Наиболее мелкие частицы, подверженные влиянию турбулентных пульсаций воздуха, образуют своеобразную «аэрозольную жидкость», движение которой описывается законами механики сплошной гетерогенной среды. Движение более крупных частиц происходит в усредненном аэродинамическом поле и сохраняет упорядоченный траекторный характер. Движение этих частиц описывается законами классической механики твердых материальных частиц.

2. Стесненный характер движения частиц. Данный фактор проявляется при высоких значениях весовой концентрации твердой фазы ($\mu \geq 20$ кг/кг). Поскольку характер движения частиц зависит от их размеров, то наряду с полной весовой концентрацией материала μ , следует рассматривать и фракционную весовую концентрацию μ_i для частиц со средним по фракции размером δ_i .

3. Взаимодействие частиц с твердыми поверхностями торообразного осадителя. В результате данного взаимодействия происходит отскок (рикошетирующие) частиц, их интенсивное закручивание, в результате чего траектории движения частиц резко изменяются, что оказывает двойное влияние на процесс классификации (в некоторых случаях повышает его качественные характеристики, а в некоторых, наоборот, снижает). Как показывает анализ дисперсного состава продукта помола, подвергаемого классификации в торообразном осадителе, относительная доля мелких частиц ($\delta < 20$ мкм) составляет 80-90%. Отсюда следует необходимость анализа особенностей их движения во внутреннем пространстве смесительной камеры.

Исследование пылеосаждения на последней стадии сепарации проводилось при помощи математической модели, описывающей движение запыленного воздуха через пористые среды. Уравнения движения частиц в матерчатом уловителе удобнее записывалось в цилиндрических координатах:

$$\frac{dr}{dt} = V_m; \frac{d\varphi}{dt} = \frac{V_\varphi}{r}; \frac{dz}{dt} = V_z;$$

$$\frac{dV_r}{dt} - \frac{V_r^2}{r} = \frac{k_\phi \cdot C_f \cdot Re}{24\tau} (V_r - W_\varphi) + a_{3r} + a_{4r}; \frac{dV_\varphi}{dt} - \frac{V_r V_\varphi}{r} = \frac{k_\phi \cdot C_f \cdot Re}{24\tau} (V_\varphi - W_\varphi) + a_{3\varphi} + a_{4\varphi}$$

$$\frac{dV_\varphi}{dt} - \frac{V_r V_\varphi}{r} = \frac{k_\phi \cdot C_f \cdot Re}{24\tau} (V_\varphi - W_\varphi) + a_{3z} + a_{4z}$$

где $a_{3r} a_{3\varphi} a_{3z}$ - составляющие ускорения силы Сафмена;

$a_{4r} a_{4\varphi} a_{4z}$ - составляющие ускорения силы Магнуса.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08054 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.