

УДК 669.1.017.3: 661.88

Д. Ю. БАБОШКО, аспирант, Г.Г. ГУБИН, канд. техн. наук, доц.,
Л.Н. КРАВЧУК, ст. преподаватель, Криворожский национальный университет
В. Г. ГУБИНА, канд. геол.- минерал. наук, ст. научн. сотр.
Институт геохимии окружающей среды НАН Украины
С.Н. ЗИМА, канд. геол.- минерал. наук, ст. научн. сотр., ПАО НИПИ "Механобрчермет"

ПИРОМЕТАЛЛУРГИЯ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ КОРЕННЫХ КОМПЛЕКСНЫХ РУД

Актуальность. Статья посвящена результатам изучения титаномагнетита Кропивенского месторождения Украины и разработке его карботермической технологии восстановления. Товарными продуктами такой технологии, использующей в качестве основного оборудования кольцевую печь с вращающимся подом, являются гранулированный легированный чугун и титаносодержащий шлак.

В настоящее время в Украине разрабатываются только месторождения россыпных титаносодержащих руд, запасы которых с каждым годом заметно уменьшаются. Введение в эксплуатацию коренных комплексных месторождений решит проблему замещения истощающихся запасов россыпных руд.

При обогащении коренных руд Кропивенского месторождения образуется значительное количество титаномагнетитового промпродукта, который при дополнительной доработки не может быть использован ни в доменных печах для получения чугуна и ни для производства титана. Поэтому актуальным является разработка технологий пирометаллургического дообогащения титаномагнетитового промпродукта. Исследования физико-химических и структурных превращений.

Цель работы. Целью работы является исследования физико-химических и структурно-фазовых превращений при пирометаллургическом дообогащении титаномагнетитового промпродукта, для установления параметров производства железосодержащих и титаносодержащих товарных продуктов.

Методы исследования. Для решения поставленной цели привлекался комплекс экспериментальных и расчетных методов: микроскопический для определения минералогического состава и строения титаномагнетитового промпродукта; спектральный анализ - для изучения химического состава зерен титаномагнетита; структурно-текстуальный анализ - для оценки новообразованных фаз при карботермическом восстановлении; рентгено-флюоресцентный анализ для оценки изменения химического состава железосодержащего и титаносодержащего продуктов; статистические методы для обработки результатов исследований. Так же использовались вспомогательные методы - макро- и микрофото съемки, компьютерная обработка текстового, цифрового и графического материала.

Научная новизна. Научная новизна одержанная авторами состоит в следующем: дальнейшее развитие получили представления о структуре зерен магнетита; впервые при карботермическом восстановлении установлены и определены структурно-фазовые превращения минерального состава титаномагнетитового промпродукта с содержанием TiO_2 более 20%; впервые определено, что формирование железосодержащего и титаносодержащего продуктов с максимальным извлечением в них металлического железа и двуокиси титана обеспечивается при условии двухступенчатого процесса восстановления; определено, что формирование и образование металлических гранул; определено, что формирование и образование металлических гранул происходит благодаря возникновению диффузии, аутогезии и поверхностного натяжения, что приводит к коалесценции металлического железа.

Практическое значение. На основании экспериментальных исследований показано, что при карботермическом восстановлении в кольцевой печи с вращающимся подом титаномагнетитового промпродукта с массовой долей TiO_2 более 20% установлены технологические параметры производства товарных продуктов: гранулированного чугуна с содержанием 92-96, 5% железа, 3,4-3,7% углерода, 0,5% ванадия и титанового шлака с 50-55% диоксида титана и 7,4-8,4 закиси железа.

Результаты. Внедрение разработанной технологии для переработки коренной руды апатит-титаномагнетит-ильменитового состава, в частности Кропивенского месторождения обеспечит получение экономического эффекта, в среднем за один год 164,5 млн грн.

Ключевые слова: россыпи, коренные руды, титаномагнетит, ильменит, углерод, восстановление, металлическое железо, титаносодержащий шлак.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-48-58-64

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В настоящее время традиционные источники железосодержащего металлургического сырья начинают замещаться комплексными рудами, которые могут в значительной степени удовлетворить потребности производства не только железосодержащих, но и других необходимых и важных продуктов, например титаносодержащих.

Украина обладает большими запасами комплексных богатых титаномагнетитовых руд, а разработанные технологии их обогащения позволяют получать титаномагнетитовый концентрат с массовой долей TiO_2 16-22%.

В настоящее время проведены исследования термохимической технологии обработки таких концентратов с массовой долей TiO_2 до 16%. В связи с истощением запасов эксплуатируемых в настоящее время россыпных руд следует разработать инновационную технологию переработки титаномагнетитовых концентратов с массовой долей TiO_2 более 20% с использованием кольцевой печи с вращающимся подом.

Анализ исследований и публикации. В настоящее время подобные руды перерабатываются в ряде стран но больше всего в ЮАР. За последнее время значительное количество исследований проведено в Российской Федерации. Однако это относится в основном к рудам и концентратам содержащим не более 6-9% TiO_2 тогда как в нашем случае, например при обогащении коренных руд Кропивенского месторождения, массовая доля TiO_2 составляет более 20%.

Предметом данной статьи является пирометаллургическая технология дообогащения титаномагнетитовых концентратов из коренных комплексных руд с целью получения из них товарных продуктов

Постановка задачи. Для определения оптимальных параметров процесса термохимической переработки титаномагнетитовых концентратов коренных комплексных руд необходимо изучить закономерности текстурно-структурных и минералогических преобразований минеральных зерен компонента.

Изложение материала и результаты. Украина имеет большие возможности для повышения своей роли в мировой титановой промышленности. Запасы Украины только по ильмениту и рутилу оцениваются в 30 % от мировых [1].

Поставщиками сырья для производства титанового пигмента являются Иршанский горно-обогатительный комбинат и Вольногорский горно-металлургический комбинат, которые перерабатывают россыпные месторождения. Из концентратов этих предприятий получают пигменты низкого качества и имеющего ограниченный спрос. Выходом из такого положения является привлечение к переработке коренных ильменитовых руд, из которых можно производить высококачественные и конкурентоспособные пигменты. На территории Украины расположено несколько месторождений комплексных коренных фосфор-титано-железосодержащих руд которые в настоящее время не разрабатываются в то время как они могли бы полностью удовлетворять потребность страны в титановом и апатитовом сырье.

Над технологией обогащения и переработки руд Носачевского, Стренигородского, Федоровского и Кропивенского месторождений работали сотрудники институтов "Механобрчермет", "Титана", "Минеральных удобрений и пигментов", "Кривбасспроект", а также представители предприятий "Кривбассгеология", Центр геология "ТАКО", ООО "Тиофаб" и ЧПП "Сириус".

Разработаны технологии обогащения сырья с отдельной переработкой титаномагнетитовой, ильменитовой частей руд коренных месторождений Украины [2]. В результате обогащения руды Кропивенского месторождения было получено пять продуктов:

титаномагнетитовый концентрат (95,5 % титаномагнетита) с содержанием основных компонентов, масс. %: $Fe_{общ}$ - 53,0; TiO_2 - 23,35; V_2O_5 - 0,654; Cr_2O_3 - 0,033;

ильменитовый концентрат (94 % ильменита) с содержанием: $Fe_{общ}$ - 36,1 %; TiO_2 - 47,5 %; V_2O_5 - 0,060 %;

плагиоклазовый продукт (95 % плагиоклаза);

оливин-пироксеновый продукт (87,3 % оливина и пироксена в сумме).

Все конечные продукты обогащения по своему составу и характеристикам отвечают требованиям, предъявляемым к такому сырью.

Предметом данной статьи является пирометаллургическая технология дообогащения титаномагнетитовых концентратов с целью получения из них товарных продуктов [3].

Предварительно было подробно изучены минералого-петрографические особенности титаномагнетитового концентрата полученного при обогащении апатит-титаномагнетит-ильменитовой руды Кропивенского месторождения. При этом применялись следующие методы исследования: микроскопический, спектральный, структурно-текстурный, рентгенофлюоресцентный анализы и статистические методы обработки полученных результатов. Так как титаномагнетит преобладает над другими минералами в концентрате (95 %), то тщательному изучению подверглись зерна магнетита.

Установлено, что зерна титаномагнетита, обособлены в пространстве, имеют такой же размер (от 0,03 до 0,6 мм) как и ильменит и часто находятся в сростках с ним (рис 1а, б, в).

Редкие зерна титаномагнетита гомогенной структуры, чаще они представляют собой агрегат из двух и больше минеральных фаз, срastaются между собой на очень тонком, субмикронном уровне, будучи элементами структур распада твердого раствора.

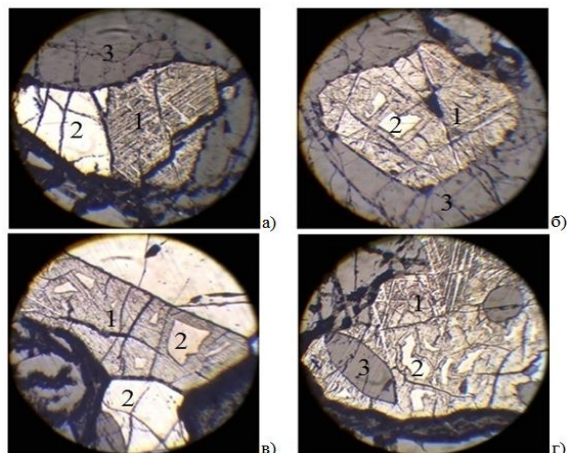


Рис. 1. Особенности структуры титаномагнетитовых зерен: *а* - рудное зерно: слева - ильменит, справа - решетчатая структура титаномагнетита; *б* - октаэдрические кристаллы «титаномагнетита» со структурой распада твердого раствора и реликтовыми включениями ильменита; *в* - ильменит в виде свободных зерен, реликтовых включений и пластинок в структуре распада твердого раствора в зерне «титаномагнетита»; *г* - пластинчатый ильменит, полуохлажденные реликтовые зерен ильменита, включение кристаллов апатита в титаномагнетите.

1 - решетчатая структура титаномагнетиты; *2* - ильменит (цвет кремовое); *3* - апатит и силикаты (различные оттенки серого)

К титаномагнетитам Кропивенского месторождения относятся обособленные зерна (по сути агрегаты из двух-четырех минеральных

фаз) химический состав которых определяется содержанием FeO , TiO_2 и Fe_2O_3 , имеющих высокие магнитные свойства. В свою очередь, титаномагнетитовые зерна характеризуются наличием разных минеральных фаз: магнетит, ильменит и в незначительном количестве Al-Mg шпинели, которые образовались после распада твердого раствора. Соотношение данных фаз в зернах титаномагнетита разное.

Магнетит образует основу матрицы зерна, в которой находятся пластинчатые выделения ильменита или ульвошпинели и микрочерны "реликт-ильменита" (см. рис. 1). Пластинчатые выделения ильменита или ульвошпинели, в основном имеют толщину до 2-3 мкм. Отдельные зерна титаномагнетита имеют пластинчатые выделения ильменита или ульвошпинели размером до 8-10 мкм. При этом наблюдаются зерна титаномагнетита с разной структурой насыщения и размером выделений (пластинок) ильменита или ульвошпинели (рис. 1*а,б* и 2*а,б*). Для титаномагнетита характерна ориентация пластинок согласно октаэдрической отдельности в магнетите, нередко с образованием решетчатых структур (рис. 1*а*).

Микрочерны "реликт-ильменита" нередко частично оплавлены, иногда одинокие, а чаще сконцентрированы в группы (рис. 1*б,в,г*). Размер включений микрочерн составляет 0,05-0,1 мм. Наличие микрочерн "реликт-ильменита" обуславливает высокое (до 25 %) содержание в зерне TiO_2 .

Также для исследованного титаномагнетита характерно присутствие большей концентрации ванадия, чем в ильмените. Это объясняется тем, что железо имеет тесную кристаллохимическую связь с ванадием, а так как ильменит имеет меньшую долю железа, то и концентрация ванадия в нем меньше [4].

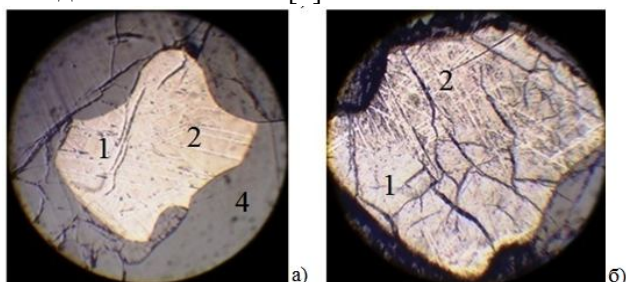


Рис. 2. Взаимоотношения ильменита и титаномагнетита в совместных вкраплениях: *а* - пластинчатые включения ильменита в титаномагнетите; *б* - однородный титаномагнетит (нижняя часть зерна), переходит в структуры распада с пластинками ильменита (верхняя часть зерна).

1 - титаномагнетит (кремовое с красноватым оттенком); *2* - ильменит (белый с сероватым оттенком), *3* - сульфиды железа (белое), *4* - апатит и силикаты (различные оттенки серого)

Знание структуры, химического и минералогического состава титаномагнетита позволило приступить к определению температурно-временных параметров карботермического восстановления, обеспечивавшего минимизацию потерь со шлаком и наиболее полное извлечение TiO_2 в титаносодержащую фазу.

Исследование карботермического восстановления окатышей из титаномагнетитового концентрата позволило установить последовательность превращений минералов при их тепловой обработке.

Экспериментально показано, что процесс восстановления железа из титаномагнетитовых зерен концентрата начинается при температуре 900 °С и завершается при температуре плавления ильменитовой части титаномагнетитового зерна, что соответствует 1470-1500°С. В начале восстановления наблюдается процесс изменения железосодержащих минералов и структуры рудных зерен титаномагнетита, вблизи поверхности которых образуется мелкая вкрапленность металлического железа. С повышением температуры до 1300°С происходит восстановление магнетитовой матрицы зерна, а металлическое железо мигрирует в межзерновое пространство и там формирует железную губку. На месте рудного зерна остается "ильменитовая сетка", которая возникла в результате восстановления магнетита. Повышение температуры до 1470-1500°С способствует восстановлению железа до металла и выносу его из ильменитовой части зерна. Образовавшееся железо мигрирует из внутренних слоев продукта и присоединяется к образовавшейся на периферии металлической фазе.

Для обеспечения необходимых технологических показателей следует соблюдать не только температурный режим, но и временной. Так нагрев до 1300°С следует вести со скоростью 20 °С/мин и выдерживает при конечной температуре 15-20 минут. Нагрев же от 1300 до 1470-1500°С надо вести со скоростью 50°С и обеспечить выдержку в течение 5 мин при конечной температуре.

На рис. 3 приведена схема карботермического восстановления титаномагнетитовых окатышей.

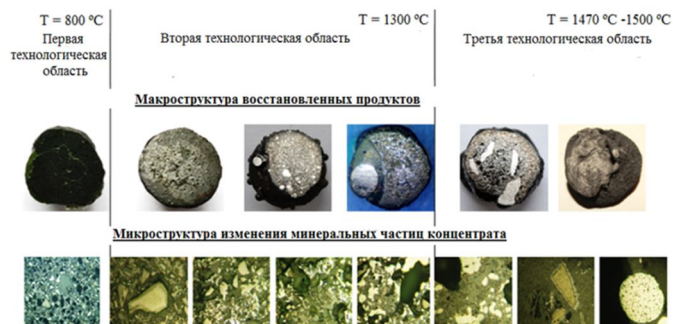


Рис. 3. Схема структурно-фазового превращения при карботермическом восстановлении окускованного титаномагнетитового концентрата

Результаты, полученные в лабораторных условиях, были проверены на укрупненной установке, на печи с вращающимся подом, что позволило подтвердить принципиальные положения карботермического процесса восстановления титаномагнетитовых окатышей.

На основании полученных экспериментальных данных была разработана для проектирования технологическая схема цепи аппаратов (рис. 4) для производства товарного титанового шлака и гранулированного легированного чугуна.

Используя такую технологию для твердофазного карботермического восстановления окатышей из титаномагнетитового концентрата Кропивенского месторождения можно получить два товарных продукта: титаносодержащий шлак с содержанием 50-55% TiO_2 и гранулированный чугун с 92-96,5 % Fe, 3,4-3,7 % C, 0,5 % V и 0,2 % Ti.

Основным оборудованием для осуществления разработанной технологии является кольцевая печь с вращающимся подом.

Конструкция кольцевых печей известна сравнительно давно, так она применялась металлургии для нагрева трубных и кольцевых заготовок пере прокаткой. В настоящее время кольцевая шахтная печь используется на металлургическом комбинате АрселорМиттал Кривой Рог для обжига известняка.

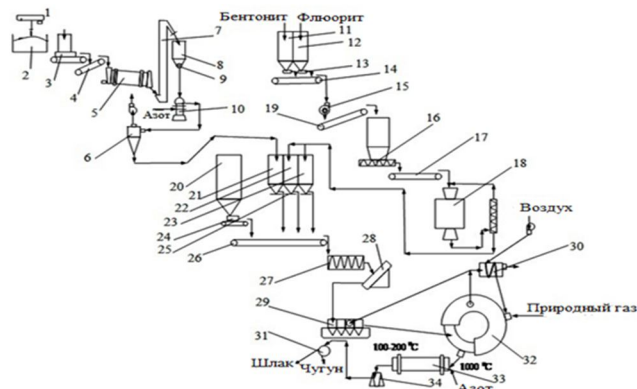


Рис. 4. Принципиальная схема цепи аппаратов переработки титаномагнетитовых концентратов Кропивенского месторождения: 1 - грейферный кран; 2 - склад угля; 3, 12, 13, 24, 28 - питатель ленточный; 4, 14, 17, 19 - конвейер ленточный; 5 - сушильный комплекс угля; 6 - блок циклонов; 7 - элеватор цепной; 8, 11, 20-23 - расходный бункер; 9 - роторный питатель; 10 - вертикальный мельница; 15 - молотковая дробилка; 16 - питатель шнековый; 18 - комплекс измельчения; 25 - питатель тарельчатый; 26 - чашевый окомкователь; 27 - смеситель Lodige; 29 - сушило; 30 - теплообменник; 31 - барабанный магнитный сепаратор; 32 - печь с вращающимся подом; 33 - охладитель; 34 - инерционная дробилка

В 60-70 годах минувшего столетия в г. Кулив, штат Миннесота (США) была спроектирована, построена и начала эксплуатироваться фабрика производительностью 2,4 млн т/год обожженных окисленных окатышей. Фабрика была оборудована кольцевой печью диаметром 30,5 м.

Американской фирмой МакКи также были спроектированы кольцевые печи четырех типоразмеров: 50, 61, 70, и 91,5 м. Годовая производительность первых трех типоразмеров для обжига окатышей из магнетитовых концентратов должна была составить 4,57; 5,07 и 6,1 млн т соответственно. Наибольшая же печь предназначалась для производства окатышей из гидрогетитового концентрата и ее производительность была рассчитана на 4,57 млн т затраты на топливо и электроэнергию кольцевых печей должны были быть ниже, чем на обычных конвейерных обжиговых машинах. В результате ожидалось, что затраты топлива снизятся на 10 %, а расход воздуха на 30 % [5].

В 1970 г. институт "Механобрчермет" (Кривой Рог, Украина) спроектировал и построил на своей опытной фабрике пилотную установку с кольцевой печью для металлизации окатышей [5,6]. Под печи был 6,2 м², внешний диаметр 3,8 м, внутренний диаметр 0,43 м, ширина рабочего пространства 0,93 м, высота рабочего пространства 0,92 м, ширина пода 1,16 м, скорость вращения 0,55-2,43 об/мин. Печь восстанавливая окатыши из магнетитового концентрата СевГОКа с 64,9 % железа. Температура в зоне металлизации была 1150-1160 °С. Производительность печи составляла 20 т/час, степень металлизации ~30 %.

При испытаниях не стремились получить высокую степень металлизации и не доводили окатыши до расплавления, т.к. целью испытаний было получение окатышей пригодных для дальнейшего их использования в доменной плавке.

По представлениям того времени металлизированные окатыши должны были использоваться в доменных печах в качестве металлдобавки. Опытно-промышленные плавки в США свидетельствовали, что каждые 10 % металлизации шихты до 50 % приводили к приросту производительности доменной печи на 4-7 % снижению расхода кокса на 5-7 %.

В данное время концепция производства и использования такого сырья изменилась, считается, что окатыши должны иметь высокую степень металлизации для замены скрапа в электроплавильных печах и чугуна в кислородных конвертерах. Поэтому конечный продукт в кольцевых печах стали пытаться получать или в виде высокометаллизированных окатышей как, например, в процессе Inmetco, или чугунов корольков, как в процессе ITmk3 [5].

Известно, что шихтовые материалы с повышенной массовой долей TiO₂ не могут переплавляться в доменных печах.

Традиционная технология переработки титаномагнетитовых концентратов начинается с их окисления и восстановительной плавки в открытых или закрытых электродуговых печах мощностью 3,5-20 МВА. При этом происходит восстановление оксидов железа, получают чугун и титанистый шлак. Чугун обычно легирован ванадием, поэтому его подвергают специальной плавке дуплекс-процессом, при которой получают два товарных продукта: ванадиевый шлак и микролегированную сталь. Производительность трехфазных печей мощностью 5-10,5 МВА составляет 35-50 т в сутки титанового шлака. Удельный расход электроэнергии достигает 2000-2500 кВт·ч/т шлака. Температура передела 1650-1750 °С. Угольная футеровка непригодна. Подину выкладывают магнетитовым кирпичом, стены защищают гарнисажем из тугоплавкого шлака.

Задача рудотермической плавки - получить богатый титановый шлак и чугун. Чтобы избежать разбавления шлака и лишних расходов, флюсы применяют редко. Плавку ведут или периодически, или непрерывно.

В первом случае в шлаках удается оставить всего 5 % монооксида железа, а во втором 8-15 %, но непрерывный передел производительнее. Для увеличения производительности и снижения расхода энергии шихту подогревают в трубчатых печах, что снижает расход энергии на плавку 1 т шлака до 1750 кВт·ч. Для экономии электроэнергии шихту не только подогревают, но и предварительно восстанавливают на 50 % или даже 85-95 %.

Сейчас разработка и развитие процессов бескоксовой металлургии железа позволяет коренным образом изменить аппаратное оформление и технологию восстановительной плавки титаномагнетитовых материалов для получения титанового шлака.

Как уже упоминалось, одну из таких технологий рекомендуется применять для переработки титаномагнетитового сырья с использованием кольцевых печей с вращающимся подом.

Например, в Российской Федерации появился ряд интересных патентов и экспериментальных работ, в которых рекомендовано применять такие печи [7-9]. Недостатком исследовательских работ является использование титаномагнетитовых руд и концентратов содержащих не более 16 % TiO_2 , а чаще всего и того меньше 3-9 %. Концентраты коренных руд Украины, например, Кропивенского месторождения содержит более 20 % TiO_2 , поэтому требуют создания специфических условий для успешной их переработки чему и посвящена данная статья. Определение оптимальных условий карбовосстановительной технологии в кольцевых печах, позволят получать два рентабельных товарных продукта: легированный, гранулированный чугуны и титаносодержащий шлак, по одностадийной технологической схеме и меньшим расходом энергии, чем по традиционной технологии.

Технико-экономический расчет с использованием современной методики показал, что предприятие, которое планируется построить по рекомендациям разработчиков предлагаемой технологии, будет иметь срок окупаемости капитальных инвестиций с учетом трех лет строительства 7,91 год (за 4,91 год эксплуатации). Такие результаты расчета могут оказаться привлекательными для инвесторов. Кроме лабораторных экспериментов, были проведены испытания на пилотной установке диаметром 2,09 м Ингулецкого горно-обогатительного комбината. Результаты этих испытаний подтвердили данные расчетов и лабораторных исследований [3].

Выводы и направление дальнейших исследований. 1. Установлено, что титаномагнетитовый концентрат из руды Кропивенского месторождения это не твердый раствор магнетита и ильменита, а механическая смесь субмикронных частиц и пластин ильменита в зернах магнетита, т.е. магнетит является матрицей, а ильменит наполнитель. Такая структура приводит к первоочередному восстановлению магнетита.

2. Изучение особенностей строения зерен титаномагнетита и поведения их при карботермическом восстановлении позволило предложить технологию переработки этих концентратов с получением железных и шлаковых товарных продуктов.

3. Выбранные температурно-временные параметры работы кольцевой печи обеспечивают высокое извлечение железа в гранулированный чугун и не допускают значительного разубоживания титаносодержащего шлака.

4. Как показали экономические расчеты ожидается снижение энергетических затрат на предлагаемую технологию переработки этих концентратов с получением товарных железистых и шлаковых продуктов.

Список литературы

1. Губин Г.В., Олейник Т.А., Татарин Ф.Г. Современное состояние мирового и внутреннего рынка титана// Разработка рудных месторождений КТУ. – Вып. 90. – Кривой Рог, 2006. – С. 100-105.
2. Олейник Т.А. Анализ разработанных технологий обогащения комплексных коренных титаносодержащих руд Украины// Вісник Криворізького технічного університету. - Кривий Ріг, 2007. – Вып. 18. – С. 92-96.
3. Губин Г.В., Ткач В.В., Губин Г.Г., Орел Т.В., Губина А.Г., Снегур Я.Я. Инновационные технологии восстановительной плавки титановых концентратов. Вісник КТУ. Вип.20. –2008. – С.74-78.
4. Зима С.Н., Бабошко Д.Ю. Особенности титаномагнетита Кропивенского месторождения Волыни. Горный журнал Казахстана, № 10, 2015. – С. 4-7.
5. Губин Г.В. Сучасні промислові способи без коксової металургії заліза / Г.В.Губін, В.О.Півень // – Кривий Ріг. – 2010. -336с.
6. В.Ф.Бернадо, Н.Н.Бережной, В.А.Бугаенко и др. Оптимальный режим металлизации окатышей в кольцевой печи. Бюллетень Центрального научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований черной металлургии, №123 (656), 1971. – С. 22-24.
7. Пат. № 2238989 Российская Федерация, С22В1/243, С22В34/12. Способ обработки титаножелезистых материалов и устройство для его осуществления / Рымкевич Д.А., Кобелев В.А., Смирнов Л.А. и др. // Открытое акционерное общество “АВИСМА титано-магнийский комбинат”; заявл. 02.10.2003; опубл. 27.10.2004, Бюл. № 30.
8. Пат. № 2318899 Российская Федерация, С22С 33/00, С22В34/12. Способ переработки титаномагнетитов / Серба В.И., Фрейдин Б.М., Калинин В.Т., Майоров Л.А. и др. // Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук; заявл. 07.07.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7.
9. Пат. № 2399680 Российская Федерация, С21В13/08. Способ металлизации титаномагнетитовых концентратов с получением железных гранул и титанованадиевого шлака / Макаров Ю.В., Садыхов Г.Б., Самойлова Г.Г., Минин В.Г. // Общество с ограниченной ответственностью “Ариком”; заявл. 10.03.2010; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26.
10. А. В. Асанов. Твердофазная металлизация продуктов полученных из титаномагнетитовых руд/А. В. Асанов, А. В. Рошин, В. Е. Рошин//Вестник ЮУрГУ. Серия "Металлургия". – 2010. – Вып. 14. - № 13 (189). – С. 32-36.
11. Л.А. Майоров. Новый подход к технологии карботермического восстановления титаномагнетита. //Материалы научной конференции "Научно-практические проблемы химии и технологии комплексного использо-

вания минерального Кольского полуострова". Апатиты, 2007. - С.95-100.

12. В. А. Ровкушин., Б. А. Боковиков, С. Г. Братчиков, Бескоксовая переработка титановых руд. – М.: Металлургия, 1985. – 247 с.

13. Л. И. Леонтьев, Н. А. Ватолин, С. В. Шаврин и др. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. М: Металлургия. – 1997. - 431 с.

Рукопись поступила в редакцию 14.02.19

УДК 004.358:621.186.1

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., Б.М. ЛІТОВКО, канд. техн. наук, доц.,
М.І. ШЕПЕЛЕНКО, аспірант, Криворізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ВІДЦЕНТРОВОГО СЕПАРАТОРА КРАПЛИННОЇ ВОЛОГИ

Мета. В гірничій промисловості, зазвичай використовують систему підготовки стисненого повітря, яке являється основним видом енергії для механізації елементів пневмозабезпечення, таких як пневматичні бурильні машини, відбійні молотки і т.д. Існує проблема постійного забруднення при транспортуванні стисненого повітря від турбокомпресора до споживача. Для забезпечення необхідної надійності та збільшення періоду експлуатації система пневмозабезпечення потребує використання додаткового устаткування для підготовки стисненого повітря. Доцільно в даному випадку використовувати контактну схему охолодження повітря.

Методи. У науковій праці розглянуті основні принципи 3D-моделювання об'єкту дослідження. В якості об'єкта візуалізації була обрана модель відцентрового сепаратора краплинної вологи. Даний апарат проектується та виготовляється в складальному виконанні. Дослідження моделі проводилось з використанням методу кінцевих елементів та методами математичної статистики для обробки даних. Використання імітаційного моделювання як бази для дослідження сепараційних об'єктів дозволяє значно скоротити час та ресурси на виготовлення об'єкта досліджень. Обґрунтованість та достовірність роботи обумовлена аналітичними та експериментальними методами досліджень, які були проведені на віртуальних моделях.

Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей раціональних конструктивних та технологічних параметрів сепаратора. Завдяки створенню зменшеної моделі відцентрового сепаратора краплинної вологи, який є частиною апарату контактної системи охолодження стисненого повітря та на її основі виготовлено макетну модель, що дозволить встановити раціональні параметри відцентрових краплевловлювачів системи пневмозабезпечення гірничого устаткування.

Практична значимість. Результати цієї роботи мають практичне значення, так як одержані в ній дані дають змогу збільшити ефективність стандартного обладнання, яке використовується на гірничих виробництвах нашого регіону.

Результати. Робота супроводжується віртуальною моделлю апарату, з допомогою якої є можливим виготовлення прототипу для лабораторного дослідження сепарації. Дана модель відповідає характеристикам реальних об'єктів та процесів.

Ключові слова: повітроохолоджувач, турбокомпресор, відцентровий сепаратор, газорідина система, краплинна волога, моделювання.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-48-64-68

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Основною задачею на промислових підприємствах є дотримання політики максимального енергозбереження. Саме поглиблений аналіз структури виробництва енергетичних ресурсів та їх розподілу між виробничими технологіями дає можливість досягнути найбільшого енергозбереження.

В теперішній час важко вказати галузь промисловості, в котрій не використовувалось стиснене повітря. Його застосування обумовлене енергетичною політикою та зміною в енергетичній структурі балансу виробництва. Також використання стисненого повітря має ряд переваг з технічної та економічної точки зору. Завдання його виготовлення та розподілу між пневмоприймачами до теперішнього часу являється актуальним, так як дане виробництво вагомо впливає на енергетичну складову собівартості продукції.

При підготовці стисненого повітря та розподілу поміж пневмоприймачами виробництва витікає проблема в його постійному забрудненні. Як відомо, при транспортуванні стиснутого повітря в повітропроводі та подачі повітря в збірники повітря, воно охолоджується, що приводить до конденсації мастила та вологи. Також повітря, яке буде використане, вмішує в собі механіч-