

**Т.А. ОЛЕЙНИК**, д-р техн. наук,

**Л.В. СКЛЯР, М.О. ОЛЕЙНИК**, кандидаты техн. наук,

**А.Ю. СКЛЯР**

(Украина, Кривой Рог, Государственное ВУЗ "Криворожский национальный университет")

### ОСОБЕННОСТИ ФЛОТАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* К началу третьего тысячелетия мировые запасы железных руд составили более 450 млрд т., из них разведанные – около 230 млрд т. Общий объем добываемой товарной железной руды превышает 1 млрд т в год, причем 55-58 % сырья используется для выплавки металла. В настоящее время железорудная продукция производится в 50 странах мира, при этом свыше 85% выпуска товарной продукции приходилось на 8 стран (Бразилия, Австралия, Китай, США, Индия, Канада, Венесуэла, Япония) [1-3]. В мировом балансе железорудного сырья по запасам, производству и экспорту Украина занимает одно из ведущих мест. На территории Украины разведаны значительные запасы железных руд, общий объем которых превышает 32 млрд т. Расположены железные руды в 4 бассейнах Криворожский, Кременчугский, Белозерский и Керченский. Основное промышленное значение имеют магнетитовые, гематитовые и гематит-магнетитовые руды. Руды различных типов отличаются минеральным составом и текстурно-структурными особенностями, что обуславливает необходимость применения различных технологий обогащения. В связи с этим глубина обогащения и технологические показатели при переработке руды каждого конкретного типа определяется ее вещественным составом, характером вкрапленности компонентов, контрастностью свойств и эффективностью применяемых разделительных процессов. Технология обогащения магнетитовых руд однотипна и предусматривает стадийное обогащение с последовательным выводом нерудной части в хвосты. Это является отличительной особенностью технологии обогащения магнетитовых руд, поскольку при обогащении большинства полезных ископаемых преследуется цель последовательного удаления рудных минералов в готовые продукты по мере их раскрытия. Истощение запасов богатых руд вместе с требованием рынка улучшить качество товарной продукции вынуждает ее производителей постоянно совершенствовать технологические схемы обогащения сырья. Содержание железа в концентратах, получаемой по магнитной технологии находится на уровне 64-67,5%. Основной прирост массовой доли железа в концентратах получают за счет введения доводочной операции – флотации. Флотационная доводка концентратов в технологическом отношении является наиболее совершенной. Она кардинально решает проблему производства чистых железорудных концентратов, вплоть до мономинеральных фракций.

*Анализ исследований и публикаций.* При флотации железных руд могут применяться три основных метода: прямая анионная, обратная анионная или обратная катионная флотация [4-8]. Выбор реагента и реагентного режима подбирается с учетом индивидуального подхода к разработке технологии флотационной доводки концентратов для каждого комбината, руководствуясь данными практики флотации железных руд и ранее выполненными исследованиями. Целесообразность применения обратной катионной флотации определяется следующими основными факторами:

- небольшие затраты катионных собирателей (не более 0,1-0,15 кг/т);
- возможность проведения флотации в воде с высокой жесткостью при высокой эффективности процесса;
- небольшой выход пенного продукта;
- высокая экологическая безопасность технологии в связи с почти полной адсорбцией аминов (катионных собирателей) на поверхности твердой фазы флотационной пульпы, а затем на поверхности частиц, входящих в состав хвостов магнитного обогащения при смешивании указанных продуктов еще в хвостовых лотках.

Процесс анионной (прямой) флотации не является альтернативой процесса катионной флотации по следующим причинам:

- высокие затраты реагента (до 3 кг/т и более);
- невозможность проведения процесса в жесткой воде.

Флотационная доводка позволяет повысить содержание железа в концентрате с 64 до 69%, а также имеет целью снизить содержание кремнезема в форме кварца и в форме силикатов до 3 %. Попутно снижается содержание щелочей ( $K_2O + Na_2O$ ) до 0,08%, которые в основном входят в состав силикатов, что позволяет подвергнуть железорудные окатыши металлизации. Требования к железорудным концентратам определяются требованиями заказчика. Важными требованиями к железорудному сырью является химическая чистота рудного минерала, способность обогащаться почти до мономинеральных концентратов, свободных от вредных примесей и соответствие требованиям дальнейшей переработки. На зарубежных предприятиях доводочные операции производят особо чистые концентраты, которые используются для электросталеплавильного производства, аккумуляторной промышленности (71-71,2% железа и до 1% кремнезема), порошковой металлургии (71,4-71,8% железа и до 0,3% кремнезема) [9].

Схемы флотации железных руд достаточно просты (табл. 1).

Они включают обычно основную, иногда контрольную флотации и две-три перечистные операции. Результаты обогащения по всем трем методам флотации железных руд примерно одинаковы. Выбор метода в каждом конкретном случае определяется стоимостью передела по каждому из них. Схемы флотационной доводки могут быть разделены на два типа.

Характеристика работы зарубежных фабрик,  
которые используют флотационную доводку магнетитовых концентратов

Страна	Фабрики	Массовая доля, %		Реагентный режим	Схема доводки
		Fe	SiO <sub>2</sub>		
США	Минтак (US Steel)	69,0	3,6	Ether amine (аминдиэтилового эфира)	Пенный продукт основной флотации доизмельчается и направляется на грохот Derrick, подрешетный продукт обогащается ММС, концентрат который объединяется с камерным основной флотации
	Nirthshore Min. Co (Clevel and Cliffs)	68,0	4,7	Амин C <sub>13</sub> -C <sub>15</sub> i диамин – 90 г/т, метилизобутилкарбинол рН в слабобокислой среде	Измельчение и перечистка пенного продукта флотацией
Канада	Адамс (Dom.f.and Stelf)	67,0-68,4	4,8	Аминоцетат – 45 г/т метилизобутилкарбинол – 23 г/т	Пенный направляется на 2 стадию измельчения, обогащается ММС, потом концентрат направляется в основную флотацию
	Гриффит (Steel Co)	68,8-69,3	4,2	Четвертичные амины	Две перечистки пенного продукта с отделением хвостов и промпродукта №1, который возвращается в основную флотацию и промпродукт №2 направляется на первую перечистку
	Шерман (Dom.f.and Stelf, Clevel and Cliffs)	67,5-68,0	5,0	Аминный собиратель и пенообразователь	Промпродукты контрольной флотации и камерный направлены на измельчение и дообогащение
Норвегия	Киркинес (б.Сидваргер)	67,0	6,3	Лилафлот Д 812 – 25 г/т (диамин жирного ряда)	Пенный продукт перечистки направляется на ММС, магнитный продукт на измельчение и дообогащение
Швеция	Кируна	69,9-68,0	2,2-4,0	–	Сначала флотирется апатит, а из камерного кремнезем
Либерия	Бонг Рейндж	66,0	6,0	–	Флотация магнетит-гематитового концентрата

Большая часть известных схем предусматривает выделение концентрата, хвостов и промпродукта, возвращаемого на дообогащение после доизмельчения или без него, (например, предприятия Гриффит и Шерман – Канада). Схемы второго типа предусматривают выделение только высокосортного концентрата и промпродукта, (предприятие Адамс – Канада). Качество получаемых флотационных железных концентратов зависит от состава руд. Так, концентраты, получаемые при флотации магнетито-гематитовых руд, содержат не менее 62-65% железа; флотации буроже лезняковых руд – 43-50% железа

В таблице 2 приведена характеристика концентратов, получаемых на ряде предприятий Украины, Австралии, Канады та США [10].

Таблица 2

Химический состав концентратов

Предприятия	Массовая доля, %		Предприятия	Массовая доля, %	
	Fe	SiO <sub>2</sub>		Fe	SiO <sub>2</sub>
Ингулецкий ГОК	63,7 67,75	10,5 6,5	Севидж-Ривер (Австралия)	67,5-69,0	1,5
Северный ГОК	66,5 68,0	10,5 6,5	Адамс (Канада)	67,0-68,4	3,0
Южный ГОК	65,0 67,5	10,5 6,5	Гриффит майн (Канада)	68,8-69,3	4,2
Новокриворожский ГОК	65,3±0,5	8,43	Шерман (Канада)	67,5-68,0	5,0
Центральный ГОК	64,5-68,5	10,5-6,5	Ризерв майнинг (США)	68,0	4,7
Полтавский ГОК	66,2 67,2	6,3 5,14	Эмпайр (США)	66,5-67	6,35

Анализ данных табл. 2 показывает, что массовая доля железа в концентратах горно-обогажительных предприятий Украины (64-66%) ниже, чем в концентратах зарубежных горно-промышленных компаний. При этом массовая доля оксида кремния – выше, что не позволяет использовать концентраты украинских предприятий для прямого восстановления железа и производства металлизированных окатышей.

Следует отметить, что в Украине флотационная доводка магнетитовых концентратов осуществляется на ЧАО "Полтавский ГОК" и ЧАО "Ингулецкий ГОК".

*Постановка задачи.* В результате анализа результатов флотационной доводки магнетитового концентрата на ГОКах Криворожского и Кременчужского железорудных бассейнов выявить основные проблемы снижения SiO<sub>2</sub> при получении высококачественного концентрата.

## Флотация

*Изложение материала и результаты.* На ЧАО "Ингулецкий ГОК" по вещественному составу и обогатимости в продуктивной толще карьера выделено семь минералого-технологических разновидностей магнетитовых железистых кварцитов [11-14]. Качество флотационных железных концентратов зависит от состава руд. В таблице 3 приведены обобщенные показатели по массовой доле железа в полученных флотоконцентратах и причины снижения их качества.

Таблица 3

Проблемы получения высококачественного концентрата при флотационной доводке

№ пп	Название разновидности	Доля разновидности	Массовая доля железа в исходной руде, общ., %	Массовая доля железа после магнитной сепарации, %	Массовая доля железа после флотационной доводки, %	Прирост массовой доли железа
1	Гематитсодержащие магнетитовые кварциты	0,7	38,7	64,05	70,1	+6,05
Проблемы		Интенсивная вкрапленность кварца крупностью 2-5 мкм в рудных слоях				
2	Магнетитовые кварциты	2,9	38,8	60,0	69,0	+9,0
Проблемы		Нерудные включения крупностью 0,005-0,015 мм в рудных слоях				
3	Силикат-магнетитовые кварциты	0,5	27,3	62,3	66,8	+4,5
Проблемы		Рудные слои содержат 25-35% куммингтонита с включениями тонкодисперсного магнетита крупностью 4-6 мкм				
4	Магнетитовые кварциты	4,8	35,35	64,45	69,2	+4,75
Проблемы		Мелкая вкрапленность магнетита в смешанных слоях				
5	Магнетит-силикатные и силикат-магнетитовые кварциты	24,1	25,6	67,4	68,7	+1,70
Проблемы		Материал благополучен для получения чистого концентрата				
6	Магнетитовые и карбонат-магнетитовые кварциты	43,6	33,7	66,5	69,0	+2,5
Проблемы		Включение магнетита в зернах куммингтонита и карбоната размером 8-30 мкм				
7	Силикат-магнетитовые кварциты	23,4	31,8	68,15	69,6	+1,45
Проблемы		Снижение качества концентрата не наблюдается				

Анализируя полученные результаты, авторы [11-14] показали, что на эф-

фективность флотационной доводки концентратов магнитного обогащения выделенных семи минералого-технологических разновидностей с применением обратной катионной флотации влияют следующие особенности их вещественного состава:

1. Наличие пойкилитовых структур (включений кварца размером 0,005–0,015 мм в зернах и агрегатах магнетита) в концентратах всех минералого-технологических разновидностей, кроме разновидностей 5 и 7, не позволяющих достичь полного раскрытия рудных зерен даже при тонком измельчении. Наиболее развиты эти структуры в концентрате магнитного обогащения разновидности 2.

2. В концентратах магнитного обогащения разновидностей 5 и 7 нерудные включения в зернах и агрегатах магнетита практически отсутствуют, что обеспечивает высокие показатели их флотационной доводки.

3. Присутствие в классе -50 мкм концентратов всех разновидностей радиально-лучистых, сноповидных, игольчатых и длиннопризматических зерен и агрегатов куммингтонита длиной более 70 мкм, не извлекаемых в пенный продукт (промпродукт) флотации. Наиболее трудно флотируемыми являются зерна и агрегаты куммингтонита с тонкой (до 3 мкм) вкрапленностью пылевидного магнетита различной интенсивности. Их наличие в различной степени характерно для всех разновидностей. Извлечение этих зерен крупностью менее 0,05 мм в пенный продукт наблюдается при повышенных расходах собирателя (100-250 г/т в зависимости от интенсивности рудной вкрапленности). В концентрате магнитного обогащения разновидности 3 зерна и агрегаты куммингтонита переполнены весьма тонкозернистым и пылеватым магнетитом. Из таких агрегатов при измельчении образуются только сростки, обедняющие флотационный концентрат и увеличивающие извлечение железа в пенный продукт флотации. Содержание железа в концентрате магнитного обогащения этой разновидности крупностью 98,4% класса минус 0,05 мм составило 62,3%, во флотоконцентрате – 66,8% при самой низкой селективности флотационного разделения.

На сегодняшний день в условиях Ингулецкого комбината на обогащение поступает сырье, в котором рудные минералы представлены магнетитом, гематитом, мартитом и гидроокислами – лимонитом и гетитом, нерудные минералы представлены кварцем, силикатами, карбонатами, сульфидами. Силикаты представлены куммингтонитом, биотитом, эгирином; карбонаты – сидероплезитом, доломитом, кальцитом; сульфиды – пиритом и пирротинном. Преобладающим силикатом почти всех технологических разновидностей является куммингтонит, который характеризуется длиннопризматической формой. При флотационном процессе куммингтонит такой формы переходит во флотационный концентрат, снижая массовую долю железа в нем. При более тонком измельчении (от 97 до 98% класса минус 0,05 мм) форма зерен куммингтонита становится близкой к изометричной. Зерна куммингтонита такой формы при флотационном процессе переходят в пенный продукт, который далее направляется в хвосты. Технологическая схема магнитно-флотационного обогащения включает

## Флотация

следующие технологические операции: основная флотация концентрата, обесшламливание в дешламаторах и мокрая магнитная сепарация пенного продукта в два приема, сгущение, фильтрование флотационного концентрата и осветление оборотной воды (рис. 1). Пенный продукт направляется на дешламацию. Пески магнитного дешламатора далее поступают в магнитный сепаратор со индукцией магнитного поля 0,1 Тл, а слив – в хвостоканаву. Магнитный продукт возвращается на перечистку во флотомашину, а немагнитный – в отвальные хвосты. На операцию осветления подаются сливы операции сгущения флотационного концентрата. Осветление осуществляется в сгустителе с помощью раствора флокулянта Magnaflok 338 (Floram AN 945). В результате осветления выделяются пески, направляемые в отвальные хвосты и осветлённый слив, направляемый в качестве оборотной воды в процесс флотации

Магнитно-флотационную доводку концентрата на ЧАО "Ингулецкий ГОК" осуществляют с применением реагента – собирателя LILAFLOT 811 М. Кроме этого может быть использован собиратель Tomatine PA-14 5%. Для усиления вспенивающих свойств собирателей используется уксусная кислота.

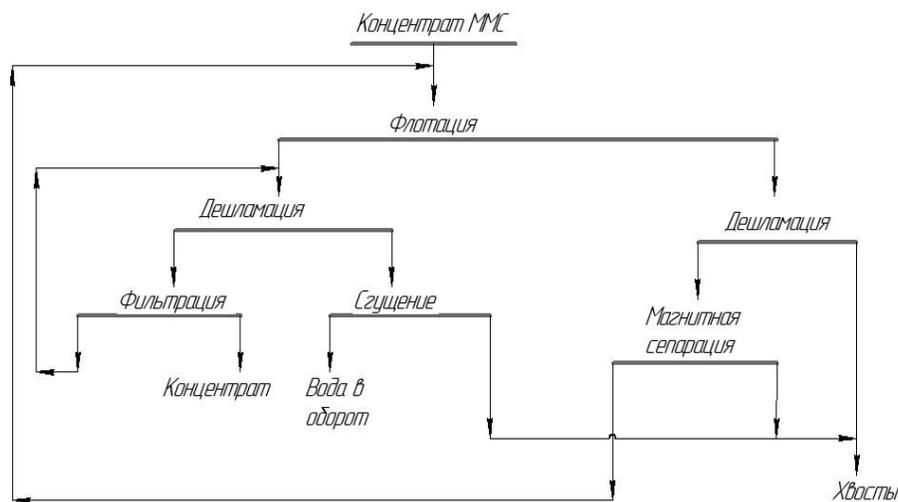


Рис. 1. Магнитно-флотационная схема доводки магнетитового концентрата

Производство концентрата по технологической схеме обогащения руды с применением обратной катионной флотации на ЧАО "Ингулецкий ГОК" позволяет увеличить массовую долю железа в концентрате от 63,7 до 67,75%.

Флотационное обогащение проводится на технической воде (табл. 4).

Таблица 4

рН	Ионный состав технической воды							Сухой остаток, г/т
	Концентрация ионов, мг/дм <sup>3</sup>							
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
8,0	200,0	204,0	167,1	925,0	1826,4	150,0	1130,0	4,9

В течение работы флотационного отделения может происходить накопление флотореагента в обратной воде и ухудшать качество концентрата. Следует осуществлять прогнозные расчеты процессов накопления флотореагента с учетом основных процессов поступления, выноса, сорбции и деструкции флотореагента. Кроме того, при создании замкнутой системы водооборота нужно решать проблему "нейтральных" солей, которые накапливаются в любой обратной системе. Современные технологии комплексной водоподготовки позволяют осуществить практически замкнутый водооборот на предприятиях. Главным препятствием при внедрении замкнутого водооборота – постепенное накопление солей жесткости в обратной воде, удаление которых – весьма дорогой и трудоемкий процесс. Разработка новых реагентов и технологий из комплексной водоподготовки в настоящее время позволяет проводить предотвращение солевых отложений и коррозии конструкционных материалов при жесткости подпитываемой воды до 15-20 ммоль/дм<sup>3</sup> (в то время, как раньше существовало ограничение 6-7 ммоль/дм<sup>3</sup>). Как правило, сточные воды промышленных предприятий характеризуются жесткостью, которая значительно превышает 7 ммоль/дм<sup>3</sup>. Следует отметить, что в практике отсутствует универсальная композиция реагентов для всех предприятий, поскольку как отмывочные составы реагентов, так и коррекционные композиции (какие иногда могут сбегаться за составом, но отличаться за концентрациями) зависят от свойств подпитываемых вод, материалов и конструктивных особенностей обратной системы водоснабжения. В технологии флотационной доводки концентрата большое внимание уделяется качеству воды, которая характеризуется содержанием взвешенных частей, катионов и анионов, рН, жесткостью и другое. Для достижения необходимого качества, воду подвергают специальной подготовке, которая включает удаление с помощью коагулянтов и флокулянтов взвешенных частей, электрохимическую обработку, корректировку ионного состава воды подачу извести, кислоты, щелочей и т.д.

Замкнутые схемы водооборота – единственное рациональное решение проблемы использования воды в промышленности. Применение замкнутых водооборотных схем предприятий позволяет размещать эти объекты в районах с ограниченными водными ресурсами.

На ЧАО "Полтавский ГОК" перерабатывают железистые кварциты Горишне-Плавнинского и Лавриковского месторождений, представленные кумингтонито-магнетитовыми кварцитами – руда пачки  $K_2^3$  и магнетитовыми кварцитами – руда пачки  $K_2^2$  и руду железную пачки  $K_2^5$ .

Первый железистый горизонт ( $K_2^2$ ) залегает на породах первого сланцевого и развитой по всему месторождению. Средняя мощность горизонта 42 м. В северной части месторождения, на участке разведывательного профиля 30, отмеченное сужение и уменьшение мощности до 15 м. Первый снизу в разрезе мираы железистый горизонт вмещает в себе три пачки кварцитов.

Второй железистый горизонт ( $K_2^3$ ) залегает на первом железистом горизонте в виде непрерывной полосы. Разделяется он на четыре пачки.

## Флотация

Третий железистый горизонт ( $K_2^5$ ) развитой в западной части месторождения, по всей его длине. Это основная рудоносная толща железистых кварцитов. Составлен горизонт серо полосчатыми, реже красно полосчатыми магнетитовыми кварцитами, в верхней части которых встречаются маломощные прослойки кварц-сланцевых хлоритизованных сланцев. Разделяется он на три пачки.

Для получения флотационного концентрата смесь концентратов магнитного обогащения подвергается дальнейшему обогащению методом обратной катионной флотации (рис. 2).

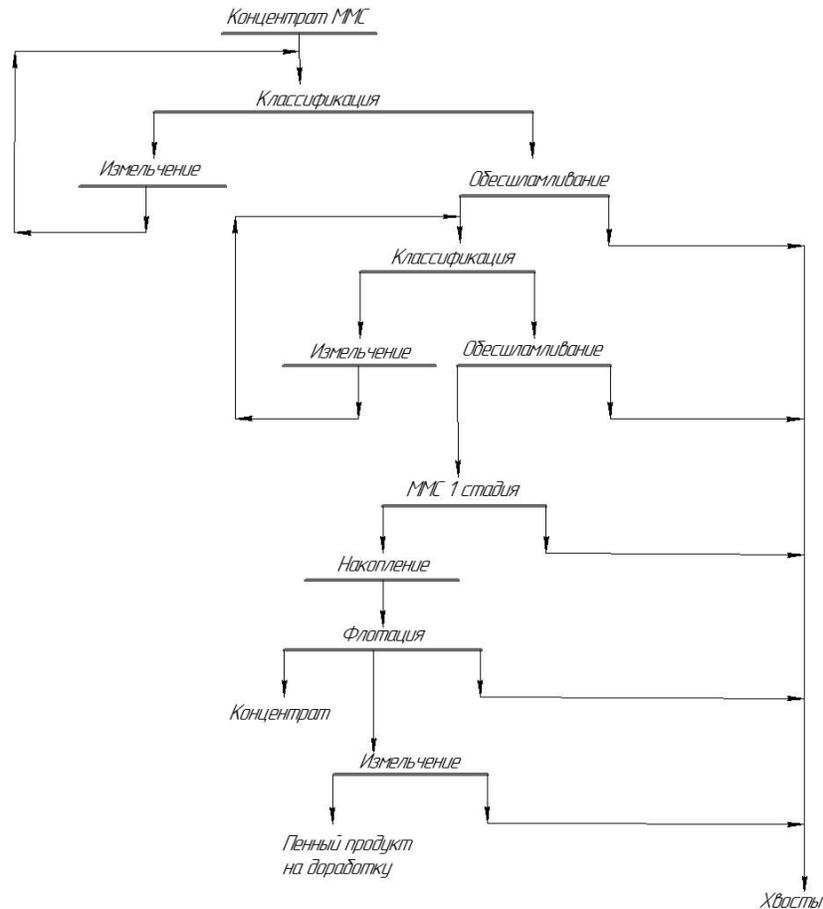


Рис. 2. Схема флотационной доводки концентрата на ЧАО "Полтавский ГОК"

Комбинированная магнито-флотационная схема включает следующие операции: основную флотацию концентратов магнитного обогащения, магнитную сепарацию концентратов магнитного обогащения, контрольную флотацию промпродукта магнитного обогащения концентрата, флотацию этого продукта совместно с концентратом магнитного обогащения производимым в шести флотокамерах. Питанием основной флотации является концентрат магнитного обогащения и камерного продукта контрольной флотации концентрата магнитного обогащения.

Магнетитовые концентраты поступают в контактный чан, перемешиваются и контактируют с реагентом, который подается в контактный чан дозирующим насосом. Этот продукт с дополнительной водой подается самотеком из контактного чана в первую камеру флотоустановки.

Процесс флотации осуществляется во флотомашине, объемом 130 м<sup>3</sup> каждая. Камеры установлены каскадно по две в одном каскаде. Пульпа, прошедшая контактирование с реагентом, поступает самотеком в первую камеру основной флотации вместе с камерным продуктом контрольной флотации. Питанием последующей камеры является камерный продукт предыдущей камеры. Камерный продукт шестой камеры является конечным концентратом флотации. Результатом доводки концентрата методом флотации являются два продукта: камерный и пенный.

Объединенные пенные продукты шести камер основной флотации и одной камеры контрольной флотации поступают самотеком в хвостоканаву и являются отвальными хвостами.

Процесс контрольной флотации осуществляется в однокамерной флотомашине, объемом 130 м<sup>3</sup>. Исходным продуктом является магнитный продукт мокрой магнитной сепарации, прошедший предварительное контактирование с реагентом в зумпфе.

Результатом контрольной флотации являются пенный продукт, идущий в хвостоканаву и камерный продукт, возвращающийся на доработку в первую камеру основной флотации. Применение флотационной доводки магнетитового концентрата с массовой долей железа 60,6% позволило повысить массовую долю железа в концентрате флотации 67,2% и уменьшить массовую долю кремнезема с 10,5 до 5,14%.

Ионный состав технической воды, используемой на ЧАО "Полтавский ГОК" приведен в табл. 5.

*Таблица 5*

Ионный состав технической воды								
рН	Концентрация ионов, мг/дм <sup>3</sup>							Сухой остаток, г/т
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
7,9	32,4	66,3	н/в	340,0	850,0	149,4	222,3	3,6

Для оценки возможности применения обратной катионной флотации на ПАО "ЮГОК" в лабораторных условиях были испытаны следующие катионные собиратели:

- 1) длинноцепочечные алифатические амины C<sub>10</sub>-C<sub>14</sub> (ТУ 113-03-0203795-018-94 "Амины C<sub>10</sub>-C<sub>14</sub> Березниковского АО "Азот" (Россия);
- 2) ацетат аминоэфиров ProcolCK921 и диаминацетат DP1-5515, DP1-4459B фирмы Ciba (Германия);
- 3) диаминацетат DA-16 фирмы TomahProductsInc (США);

## Флотация

4) смесь ацетатов аминов кокосового масла "Лиладель" ККАС" фирмы KenoGard (Норвегия).

Опыты проводили в открытом цикле на технической воде при естественном значении рН. Ионный состав технической воды приведен в таблице 6. В этих условиях при доработке пробы текущего концентрата ПАО "ЮГОК" получены следующие результаты: амины C<sub>10</sub>-C<sub>14</sub> – получены концентраты с содержанием железа 68,2-70,6%; Procol 4459B – флотация не происходит; ProcolCK921 – концентраты с содержанием железа 67,0-67,7%; DP1-5515 – концентраты с содержанием железа 69,2-69,8% (при этом образование густой неразрушающей пены затрудняет ведение процесса флотации); DA 16 – получены концентраты с содержанием железа 68,5-69,5% (вместе с тем реагент обладает теми же недостатками, что и в предыдущем случае). Катионный собиратель "Лиладель ККАС" также позволяет повысить содержание железа в концентрате до 69,8-70,4%, но только при использовании водопроводной воды. Поскольку технические условия на реагенты "Лиладель" предусматривают ограничения по ионному составу воды, их применение в условиях жестких технических вод ГОК Украины становится проблематичным.

Таблица 6

рН	Ионный состав технической воды							Сухой остаток, г/т
	Концентрация ионов, мг/дм <sup>3</sup>							
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
8,3	522,0	611,2	112,2	1200,0	15177,0	230,0	9015,0	27,0

В лабораториях кафедры обогащения полезных ископаемых Криворожский национальный университет были проведены исследования по флотационной доводке концентратов ЧАО "СЕВГОК" для получения конечного материала с содержанием железа 69,0%. Флотационной доводке подвергался концентрат магнитного обогащения с массовой долей железа 63,3-65,6%. Были протестированы различные амины марки Procol и их смеси. Расход собирателя варьировался в пределах от 60 до 640 г/т. Определено, что для получения концентратов с массовой долей железа общего больше 68% расходы амина находятся в пределах от 120 до 150 г/т. Фактический расход амина при промышленном производстве высококачественного железорудного концентрата будет в первую очередь зависеть от степени раскрытия минералов в питании и качества питания.

Для получения концентрата с содержанием SiO<sub>2</sub> менее 3% при максимальном извлечении железа необходимо в схеме предусмотреть контрольную переочистку камерного продукта. Для увеличения степени раскрытия минералов перед низко-интенсивной магнитной сепарацией следует провести доизмельчение хвостов флотации (пенного продукта). При увеличении тонкости помола улучшаются характеристики раскрытия, и, как следствие, повышается качество концентрата и извлечение железа. Эксперименты проводили на технической воде при естественном значении рН. Ионный состав технической воды приведен в таблице 7.

Ионный состав технической воды								
рН	Концентрация ионов, мг/дм <sup>3</sup>							Сухой остаток, г/т
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
8,0	280,0	409,0	142,7	785,0	5650,0	250,0	3000,0	10,7

### *Выводы и направления дальнейших исследований*

В результате анализа результатов флотационной доводки магнетитового концентрата на ГОКах Криворожского и Кременчугского железорудных бассейнов, можно сделать выводы:

1. Железные руды, которые перерабатываются на ГОКах Украины, характеризуются значительными различиями в вещественном составе, изменчивостью минералогических разновидностей, неравномерной вкрапленностью рудных и нерудных минералов, разнообразием текстурно-структурных особенностей, широким диапазоном физико-механических свойств.

2. Качество получаемых флотационных железных концентратов зависит от состава руд. Так магнитно-флотационная доводка концентратов на ЧАО "Ингулецкий ГОК" обеспечивает получение флотационного концентрата не менее 67,75% железа; при флотации магнетитовых руд ЧАО "Полтавский ГОК" содержат не менее 67,2% железа.

3. Флотационная доводка магнетитовых концентратов ПрАТ "Южный ГОК" на технической воде при естественном рН = 8,3 и расходе катионных собирателей 100-150 г/т позволяет получить в лабораторных условиях концентраты содержанием железа 68,2-70,6%.

4. Флотационная доводка магнетитовых концентратов ЧАО "СевГОК" с массовой долей железа 63,3-65,6% позволяет получить конечный концентрат с массовой долей железа 69,0%.

5. Прирост содержания железа при флотационной доводке черновых магнитных концентратов колеблется на фабриках от 1,45 до 9% при среднем уровне от 3,2 до 5%. Извлечение железа в концентраты зависит от содержания его в рудах и изменяется от 65 до 85%.

6. Согласно требованиям промышленности, к качеству железорудных концентратов, полученные флотационной доводкой концентраты, соответствуют требованиям для доменного производства по массовой доле железа, кремния и вредных примесей.

7. Для обеспечения экологической безопасности производства необходимо осуществление полного замкнутого водооборота или применения специальных методов водоочистки, что достаточно сложно технически и невыгодно экономически [27].

Следует отметить, что в течение работы флотационного отделения может происходить накопление флотореагентов в оборотной воде. Поэтому нужно заранее осуществлять прогнозные расчеты процессов накопления флотореагента в оборотной воде с учетом основных процессов поступления, выноса, сорбции

и деструкции флотореагента. Расчетная схема обращения флотореагента нужна для разработки прогнозной модели его динамики. С учетом того, что техническая вода в системах горно-обогатительного комбината находится в обратном цикле, расчетная схема обращения флотореагента в системе обогащения железной руды будет иметь циклический вид.

### Список литературы

1. Близнюков В.Г., Салганик В.А., Штанько Л.А. Железородная промышленность мира (состояние и перспективы) // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – №2.
2. Сентемова В.А. Проблемы повышения качества концентратов на железорудных обогатительных фабриках // *Технология переработки руд и техногенного сырья*. – 1997 – №2.
3. Сентемова В.А. Флотация в схемах обогащения магнетитовых руд // *Обогащение руд*. – 2007. – № 2.
4. Белан Ф.Н. Пути освоения флотации железных окислов в Криворожском бассейне // *Известие Вузов. Горный журнал*. – 1960. – №3.
5. Бехтле Г.А., Румянцева Н.М. Флотация гематита, магнетита и мартита некоторыми собирателями анионного и катионного типа // *Вопросы разработки месторождений КМА*.
6. Бехтле Г.А., Силищенская Н.М., Глембоцкий В.А., Плаксин И.Н. Флотация железных минералов из хвостов магнитной сепарации обогатительных фабрик КМАруда // *Горный журнал*. – 1958. – №1.
7. Глембоцкий В.А. Флотация железных руд. – М.: Недра, 1964. – 223 с.
8. Грестан Е.Л., Турецкий Я.М. Обогащение железных руд и доводка магнетитовых концентратов методом обратной флотации // *Горный журнал*. – 1961. – №12.
9. Авдохин В.М., Губин С.Л. Современное состояние и основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд // *Горный журнал*. – 2007. – №2. – С. 58-64
10. Кармазин В.В. Перспективное развитие технологии обогащения железорудного сырья // *Горный журнал*. – 2008. – №12. – С. 70-73.
11. Куповец В.А., Панова Л.П. Сырьевая база Ингулецкого ГОКа и ее комплексное использование // *Горный журнал*. – 1985. – №6.
12. Арсентьев В.А., Дендюк Т.В. Исследование и разработка технологии флотационной – магнитной доводки магнетитовых концентратов // *Обогащение руд*. – 1987. – №3.
13. Пивень В.А., Дендюк Т.В., Калиниченко А.Ф., Бухлаева Н.П. Флотодоводка магнетитовых концентратов Ингулецкого ГОКа // *Обогащение руд*. – 2004. – №1. – С. 31-34.
14. Пивень В.А., Дендюк Т.В., Калиниченко А.Ф. Применение обратной катионной флотации для доводки концентратов магнитного обогащения кварцитов Ингулецкого ГОКа // *Горный журнал*. – 2003. – Спец. вып. – С. 31-35.

© Олейник Т.А., Скляр Л.В., Олейник М.О., Скляр А.Ю., 2017

*Надійшла до редколегії 15.09.2017 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*