

В.И. ГОЛОВАНЬ,

Г.В. ГУБИН, д-р техн. наук

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

КОРОТКАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ОБОГАЩЕНИЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ ВЫСОКУЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНЦЕНТРАТА

Постановка проблемы. Технологическая схема рядовой фабрики для обогащения магнетитовых руд, назовем ее классической, как правило, состоит из сухой части и мокрой, сухая часть включает в себя дробление, состоящее из трех – четырех стадий в зависимости от физических свойств руды и производительности установленного оборудования. В последних стадиях дробления применялся замкнутый цикл, что существенно увеличивает капитальные затраты на строительство перегрузочных узлов, участков классификации, соответственно увеличиваются занимаемые площади, в основном это конвейерные тракты, обеспечивающие замкнутые циклы дробления.

Мокрая часть классической технологической схемы для обогащения магнетитовых руд включает в себя три стадии измельчения, каждая мельница работает в замкнутом цикле с классифицирующим устройством, эффективность классификации очень низкая до 42-45% в начальных стадиях и 25-30% в конечных стадиях. Один или два приема обесшламливания, четыре – пять стадий магнитной сепарации, причем в каждой стадии магнитной сепарации два – три приема. Магнетитовые фабрики потребляют значительное количество воды, необходимой для транспортировки измельченной руды и выполнения требований технологического регламента. На одну технологическую секцию подается технической воды от 3 до 6 тыс. м³/ч. В среднем такая схема насчитывает в разных случаях от 17 до 28 приемов и операций. Естественно затраты энергии колоссальные. Если рассматривать распределение затрат энергии, то на измельчение тратится до 70-80% всей электроэнергии потребляемой обогатительной фабрикой [1]. Так, если на классическую фабрику, с производительностью (15-20 млн т концентрата в год, Украина), подается, например 300 МВт энергии, то на измельчение тратится ≈ 210 МВт.

Анализ последних достижений. При создании новых и реконструкции существующих обогатительных фабрик для магнетитовых руд все разработчики стремятся сократить число технологических операций, уменьшить количество применяемого основного технологического оборудования, использовать в технологическом процессе меньше воды, электроэнергии и т.п. В основном это выражается в том, что на некоторое время убирается из схемы один прием магнитной сепарации, реже сокращается число стадий измельчения. Основная проблема старых обогатительных фабрик оставшихся на территории бывшего СССР в том, что на момент их проектирования в обогатительный передел в ос-

новном поступали руди крупно и средне-вкрапленные, а требования к качеству концентрата были значительно ниже, чем сегодня.

Основная технологическая операция, предшествующая магнитному обогащению, это снижение крупности добытой руды до крупности раскрытия минеральных частиц и сегодня, как и 50-60 лет назад, эта важнейшая операция в условиях украинских ГОКов производится на морально и технологически устаревшем оборудовании.

Целью данной работы является разработка технологической схемы, позволяющей значительно снизить расход энергии на измельчение и уменьшить количество оборудования на обогатительной фабрике.

Изложение основного материала. Применяемые шаровые мельницы не в состоянии обеспечить качественное раскрытие рудных зерен из минеральных сростков, и являются низкоэффективными с точки зрения затрат электроэнергии. Установлено, что при падении шаров диаметром 30-125 мм максимальное усилие в контакте достигает 500-600 кН, напряжение 2500 МПа [2-4]. Такой высокий запас энергии шаровой загрузки является избыточным и приводит к большому расходу мелющих тел и футеровки в результате ударно-абразивного износа и является причиной интенсивного шламообразования. Ухудшаются параметры раскрытия рудных минералов, минеральные комплексы не раскрываются по границам сростания на рудные и нерудные зерна, а разрушаются, образуя богатые и бедные сростки, затрудняя процессы разделения в магнитных полях сепараторов, снижая качественные показатели конечного концентрата. Расчетным путем определено, что разрушающие напряжения в хрупких шаровидных частицах составляют 60-100 МПа, при диаметре частицы 0,1-0,02 м, а разрушающие усилия будут находиться в пределах $F_1 \geq 3,75-6,25$ кН и $F_2 \geq 15-25$ кН. В цилиндрических частицах диаметром 0,01-0,02 м при разрушающих напряжениях 60-100 МПа разрушающие усилия составят $F_1 \geq 4,28-7,14$ кН и $F_2 \geq 17,14-28,56$ кН. Таким образом, при равных нагрузках в шаровидной частице возникают большие разрушающие напряжения, значительно превышающие значения, необходимые для дезинтеграции частиц.

На Североамериканских фабриках, перерабатывающих руды типа таконит, еще в прошлом веке применялись сравнительно более короткие технологические схемы, чем на фабриках бывшего СССР. Этому были свои причины, которые не рассматриваются в данной публикации.

Наиболее простым в осуществлении, при использовании традиционных подходов к решению проблемы, является снижение крупности дробленой руды, поступающей на измельчение. Так, увеличение на 1 кВтч/т энергозатрат при дроблении снижает крупность дробленой руды и дает экономию электроэнергии 3-4 кВтч/т, при последующем измельчении. Снижение крупности дробленой руды с 25 до 12 мм позволило снизить расход энергии измельчения на 15-16%, потребление футеровки, шаров на 22-23%, эксплуатационные затраты на 12-17%, но в целом проблема остается.

Энергоемкость процесса разрушения железистых кварцитов, то можно считать прямо пропорциональной квадрату предела прочности руды, причем,

Підготовчі процеси збагачення

этот параметр имеет значительно меньшее значение при приложении сил сдвига (меньше 6-7 раз), при использовании сил растяжения этот параметр снижается в 8-10 раз. В результате энергоёмкость процесса разрушения резко снижается, примерно в 40 и 90 раз соответственно [5]. По мнению большинства исследователей, измельчение руды следует проводить при превалировании сдвиговых и истирающих нагрузок. По такому принципу происходит измельчение руд в вертикальных мельницах типа Vertimill. Снижение потребления энергии в вертикальных мельницах в сравнении с шаровыми достигает 25-30%. Эффект снижения энергопотребления при одновременном росте производительности наблюдается при работе обычных шаровых мельниц с высокой степенью заполнения мелющими телами. Исследования показывают, что оптимальными для сокращения затрат энергии являются коэффициенты заполнения барабанных мельниц 0,7-0,75 и относительной скоростью вращения 0,6-0,7 [6, 7].

Тесты, проведенные в лаборатории фирмы производителя, показали возможность успешного применения роликовых мельниц для измельчения железистых кварцитов.

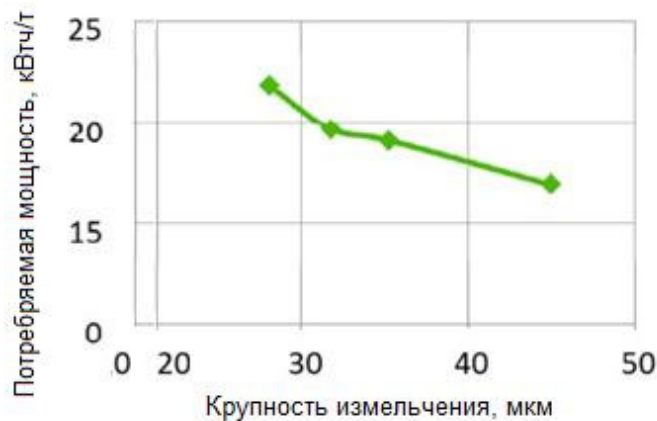


Рис. 1. Расход энергии для измельчения одной тонны железистых кварцитов до крупности раскрытия минеральных зерен в роликовой мельнице

Затраты энергии сопоставимы или же имеют тот же порядок, что и при измельчении в шаровых мельницах. Но при этом необходимо учитывать тот факт, что индекс Бонда для тестируемой руды исходной крупностью $F_{80} = 3$ мм и конечной крупностью $P_{80} = 32$ мкм показал расход энергии $BW_i = 14-19$ кВтч/т, при тесте на роликовой мельнице, для исходной крупности $F_{80} = 11$ мм и конечной крупности $P_{80} = 32$ мкм получен примерно такой же расход энергии $BW_i = 17-18$ кВтч/т [8].

Если сравнивать энергоэффективность мельниц различных типов, то по затратам энергии на 1 мкм уменьшения крупности измельчаемого материала полупромышленная вертикальная роликовая мельница является одним из самых эффективных аппаратов среди применяемых для измельчения железистых кварцитов (табл. 1).

Затрачиваемая энергия составила 1,7 Вт/мкм при измельчении магнетитовой руды криворожского бассейна в роликовой мельнице. При измельчении

Підготовчі процеси збагачення

аналогичной руды в шаровых мельницах затраты энергии составляют 5-7 Вт/мкм и в мельницах типа Vertimill производства Metso Minerals 4-6 Вт/мкм это показывает, что энергоэффективность процесса измельчения в роликовых мельницах выше в 2-3 раза.

Если предположить, что и промышленная вертикальная роликовая мельница затрачивает такое же количество энергии на измельчение, как полупромышленная то эффективность этого устройства вне конкуренции.

По мнению специалистов фирмы производителя, стандартная мельница максимального типоразмера сможет принять кусок крупностью $P_{80}=200$ мм. На основании этих исследований появилась возможность разработки короткой технологической схемы для обогащения тонковкрапленных магнетитовых руд.

Существенная разница в крупности исходного питания и получаемого измельченного продукта – это основное преимущество роликовых мельниц. Одним из основных преимуществ роликовой мельницы является возможность работы с исходной рудой крупностью $F_{80} = 200$ мм, получая на выходе из мельницы готовый класс крупности $P_{80} = 32$ мкм, то есть руду в крупности раскрытия минеральных зерен.

Таблица 1

Сравнение эффективности измельчения руды в мельницах различных типов

№ п/п	Тип мельницы	Крупность питания,	Крупность конечная,	Рабочий индекс Бонда	Удельный расход энергии
1	2	3	4	5	6
Шаровая мельница					
1	Сырая руда	F_{80} , мкм	P_{80} , мкм	BWi, Ватт	Ватт/мкм
2	Руда после HPGR	2705,00	68,00	14200,00	5,38
3	Руда после магнитной сепарации	1948,00	59,00	12780,00	6,77
3	Руда после магнитной сепарации	1620,00	70,00	11730,00	7,57
Шаровая мельница 2 стадия					
4	Питание	179,00	33,00	17300,00	118,49
Тест Бонда для железистых кварцитов					
5	BWi17	2668,00	36,00	20100,00	7,64
6	BWi18	2557,00	39,00	18700,00	7,43
7	BWi19	2643,00	38,00	19400,00	7,45
8	BWi20	2608,00	40,00	18800,00	7,32
"©Алтай полиметал" VERTIMILL					
VTM	BWi i сульфидная руда (медная руда)	3000,00	64,00	19560,00	6,66
VTM	BWi i оксидная руда (медная руда)	3000,00	64,00	14140,00	4,82
VERTIMILL®					
Northlands магнетитовая руда Швеция					
Шары 25 mm					
VTM	Месторождение Tapuli	660,90	34,00	20010,00	31,92
VTM	Месторождение Sahavaara	438,60	34,00	21810,00	53,91
Шары 19 mm					
VTM	Месторождение Tapuli	660,90	34,00	17310,00	27,61
VTM	Месторождение Sahavaara	438,60	34,00	16710,00	41,30
	Вертикальная роликовая мельница	F_{80} , μ k	P_{80} , μ k	BWi, Watt	Watt/ μ k
	Полупромышленная (Test 11.2013)	11200,00	32,00	19000,00	1,70

Существенная разница в крупности исходного питания и получаемого измельченного продукта – это основное преимущество роликовых мельниц. Од-

Підготовчі процеси збагачення

ним из основных преимуществ роликовой мельницы является возможность работы с исходной рудой крупностью $F_{80} = 200$ мм, получая на выходе из мельницы готовый класс крупности $P_{80} = 32$ мкм, то есть руду в крупности раскрытия минеральных зерен.

Из всех дезинтеграторов, применяемых для снижения крупности железистых кварцитов, у роликовых мельниц наибольший диапазон применения, если рассматривать размеры куска в исходном питании и размер частиц в получаемом измельченном продукте (рис. 2).

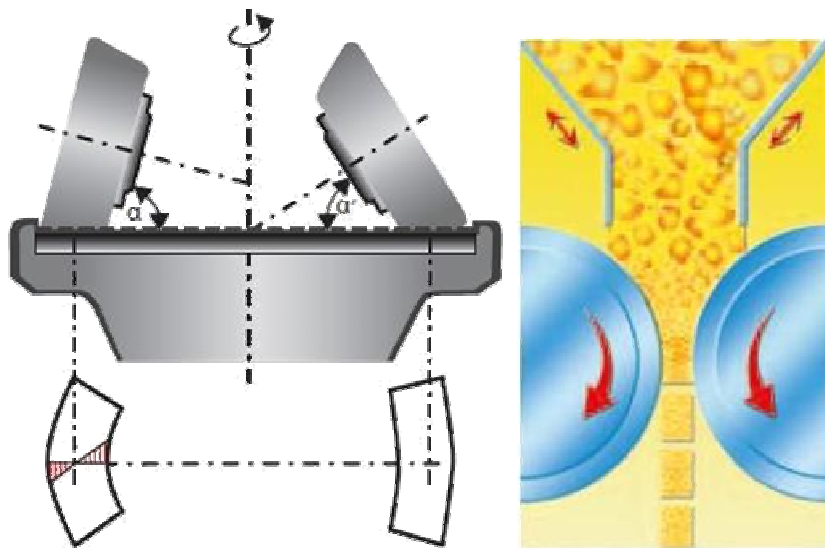


Рис. 2. Типовые диапазоны крупности для различных дезинтегрирующих аппаратов

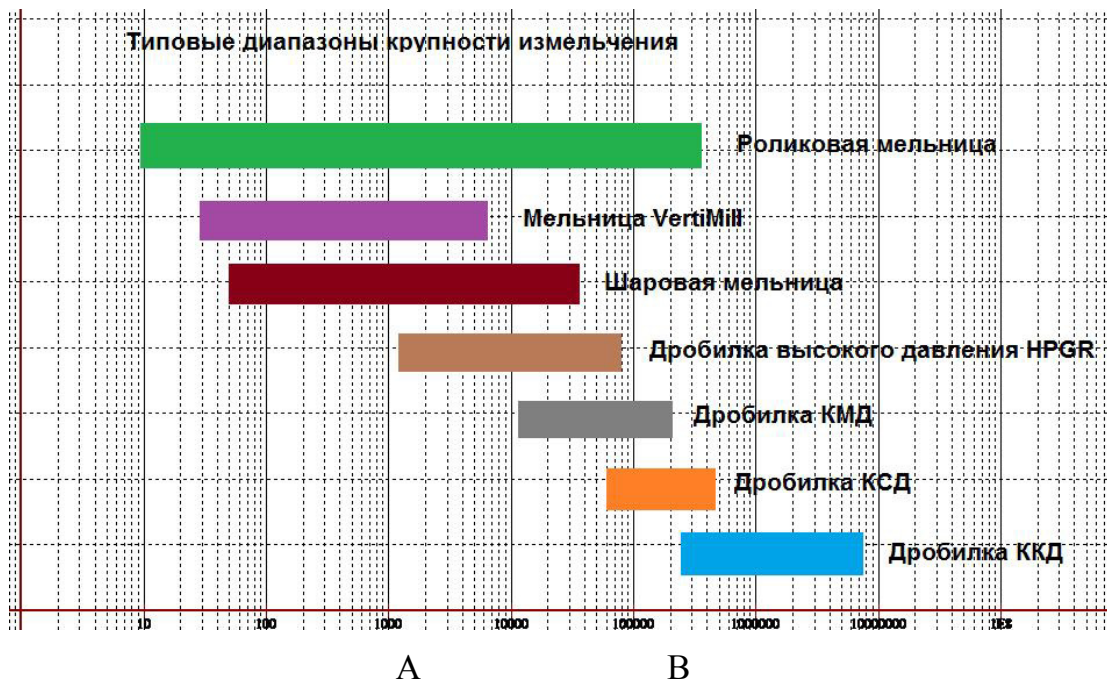


Рис. 3. Кинематическая схема работы рабочих органов роликовой мельницы (А) и роллер-пресса, дробилки типа HPGR (В)

Підготовчі процеси збагачення

В данном случае вертикальная роликовая мельница объединяет в себе функции дробилок второй и третьей стадии со всеми грохотами, а также функции мельниц всех стадий измельчения, включая классифицирующие устройства.

В мировой практике дезинтеграции железных руд к такому симбиозу приблизительно подходят только дробилки типа HPGR и стержневые мельницы. Как известно, при преобладании раздавливающих и истирающих нагрузок создаются условия для более полного и качественного раскрытия рудных зерен с образованием минимального количества сростков. В дробилках типа HPGR преобладающим способом дезинтеграции является раздавливание. У этих дробилок максимальный размер куска в питании 60-80 мм. Крупность материала в разгрузке, примерно 3-6 мм, при крупности материала в разгрузке 0,5-1 мм наблюдается значительная потеря производительности и рост циркулирующей нагрузки до 300-400%. В результате дробилки типа HPGR смогут заменить только дробилки типа КМД и шаровые мельницы первой стадии измельчения и то лишь частично.

Вертикальная роликовая мельница по способу разрушения похожа на дробилки HPGR с разницей в том, что разрушение рудного материала в дробилках HPGR происходит исключительно за счет раздавливания в вертикальной плоскости, а вертикальная роликовая мельница работает в горизонтальной плоскости. Разрушение происходит по системе сжатия с использованием усилия сдвига (Рис.3), это создает ряд дополнительных положительных эффектов как технологического, так и механического характера [9].

Разрушение руды в барабанной шаровой мельнице происходит, в основном, при ударных нагрузках; в этом случае частицы руды получают от падающих шаров избыточную энергию, превышающую необходимую и достаточную для разрушения энергию в десятки раз. Это является причиной низкой энергоэффективности шаровых мельниц, служит источником таких негативных явлений, как, например, шламообразование. В отличие от шаровой мельницы вертикальная роликовая мельница является измельчительным агрегатом практически полностью управляемым технологическим процессом, который может автоматически приспосабливаться к изменению физических свойств исходной руды прямо в процессе работы. Конструкция узла измельчения роликовой мельницы позволяет выбирать принцип измельчения в зависимости от физико-механических свойств руды. Это может быть преобладание сдвиговых усилий над усилием раздавливания в различных комбинациях. Это очень важно для предотвращения таких негативных явлений, как переизмельчение, износ рабочих органов мельницы, а также для повышения массовой доли фракции необходимой крупности, получения "крутых" ситовых характеристик.

Роликовая мельница представляет собой "сухое" измельчительное устройство с полностью управляемым процессом, в отличие от шаровой мельницы, управление которой является весьма сложным.

Очень хорошо заметна разница, при сравнении двух технологических схем для переработки магнетитовых кварцитов: "классической" и с применением роликовой мельницы (Рис. 4). Использование роликовой мельницы позволяет со-

Підготовчі процеси збагачення

кратить число основных технологических операций в несколько раз, на примере можно показать, что на классической обогатительной фабрике из технологической схемы удаляется более 120 (!) аппаратов, устройств и агрегатов. Сокращается занимаемая площадь, так как отсутствуют конвейеры, перегрузочные узлы, узлы классификации и т.п.

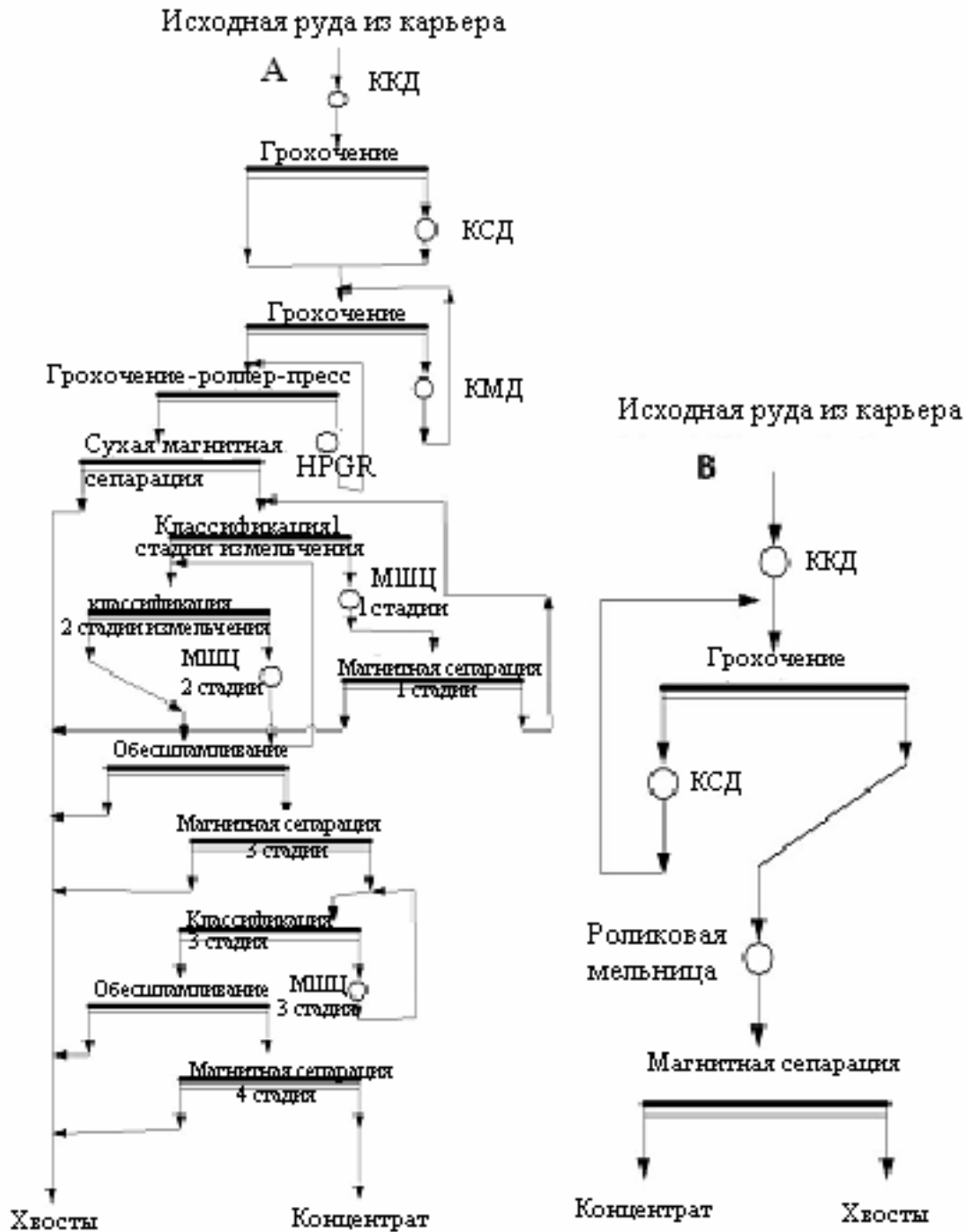


Рис. 4. Классическая и рекомендуемая короткая технологические схемы для обогащения железистых кварцитов

Підготовчі процеси збагачення

Рост общей производительности при использовании короткой технологической схемы происходит за счет сокращения числа операций магнитного обогащения, так как в этом случае сокращается количество неизбежных потерь железа в хвостах магнитных сепараторов и повышается извлечение магнитного железа в концентрат. Рост общей производительности происходит также и за счет того, что технологическая схема с роликовой мельницей короткая и время необходимое для наполнения и запуска такой схемы сокращается. Так для запуска "классической" схемы на ГОКе необходимо от 1 до 1,5 часов. В случае короткой схемы время наполнения и соответственно запуска технологической схемы в работу после плановых или аварийных остановок сокращается до 15-20 минут, а обогащаемый материал проходит через технологическую цепочку в 4-5 раз быстрее.

Применение вертикальных роликовых мельниц в процессе рудоподготовки на сегодняшний день является, по мнению авторов, одним из самых перспективных кардинальных решений.

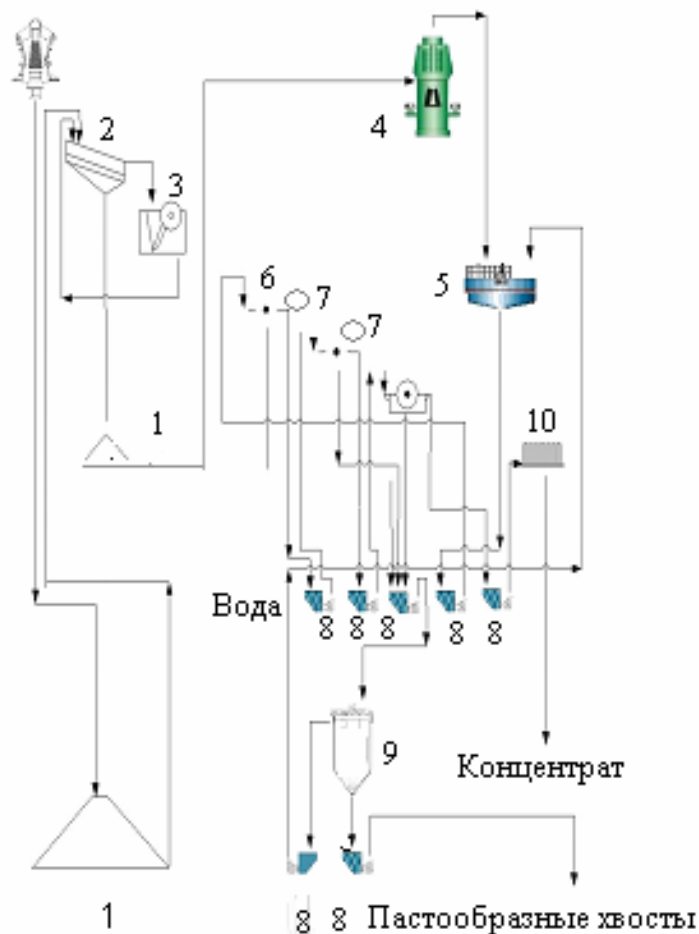


Рис. 5. Схема цепи аппаратов для компактной модульной обогатительной фабрики на борту карьера:

- 1 – склад дробленой руды; 2 – грохот; 3 – дробилка щековая;
- 4 – мельница вертикальная роликовая; 5 – смеситель; 6 – сепаратор магнитный ПБМ-П;
- 7 – сепаратор магнитный ПБМ-ПП; 8 – насос; 9 – сгуститель пастовый;
- 10 – фильтр вакуумный

Підготовчі процеси збагачення

В плане энергоэффективности, а именно по затратам энергии, необходимой для сокращения рудного куска от исходного размера, который входит в мельницу, до конечного размера, на выходе из мельницы, вертикальные роликовые мельницы превосходят шаровые барабанные мельницы первой стадии в десятки раз.

Только появившись сразу стал хитом новейший многодвигательный привод для вертикальных роликовых мельниц. Такое техническое решение, помимо прочих преимуществ, позволяет использовать низковольтную сеть (400-690 В) для привода мельниц.

Технологическая схема может состоять из одной стадии крупного дробления, т.к. агрегаты вертикальных роликовых мельниц являются одновременно дробилками и мельницами, принимая кусок размером до 200 мм, а конечным продуктом является материал минус 40 мкм. Для обогащения дробленого продукта достаточно одной стадии магнитной сепарации, в которую могут входить одна или две операции перечистки магнитного продукта.

Радикальное снижение количества основных технологических операций – это серьезные сокращения капитальных затрат. Одна вертикальная роликовая мельница заменяет все технологические операции в традиционной схеме после дробилки крупного дробления до финальной стадии магнитной сепарации, являясь при этом более энергоэффективной в сравнении с шаровой мельницей.

По предварительным подсчетам при измельчении железистых кварцитов до крупности 98% минус 40 мкм, расход металла на одну тонну конечного продукта, в вертикальных роликовых мельницах, составит 400-500 г/т. В классической схеме необходимо будет учесть расходы футеровок дробилок среднего и мелкого дробления, а также расходы футеровок всех трех стадий измельчения, расход шаров, сюда также футеровки классифицирующих устройств, металл продуктопроводов, расход конвейерных лент, и т.п. Только расход шаров в барабанных мельницах, по самым оптимистическим подсчетам, измеряется килограммами.

Использование сухого измельчительного комплекса с вертикальной роликовой мельницей в операциях рудоподготовки, в новых проектах или при модернизации старых фабрик, можно с уверенностью назвать инновационно-эволюционным решением для создания максимально надежной функциональной технологической схемы. В перспективе, по окончании исследований по разработке сухих магнитных сепараторов циклонного типа, возможен полностью сухой обогатительный передел для магнетитовых кварцитов, сильномагнитных и слабомагнитных руд. При полностью сухом процессе нет необходимости использовать земли сельскохозяйственного назначения под хвостохранилища для складирования жидких хвостов.

Роликовая мельница является универсальным агрегатом и может применяться, как в сухих, так и в мокрых технологических схемах. Вертикальная роликовая мельница открывает совершенно новые перспективы в горно-обогатительном производстве, особенно интересным такое решение является для экономии энергии, воды и земли.

Выводы

1. Показано, что прилагаемые ударные нагрузки при традиционных способах измельчения превышают необходимые для разрушения руд.

2. Снижение ударных нагрузок и замена их касательными (тангенциальными) приводит к значительному уменьшению расхода энергии на измельчение руд, о чем свидетельствует опыт применения вертикальных мельниц, промышленные испытания шаровых барабанных мельниц с повышенной степенью заполнения. Особенно эффективным является измельчение в вертикальных роликовых мельницах.

3. На основе нового типа мельниц разработана технологическая схема, позволяющая в разы снизить количество оборудования на обогатительной фабрике и снизить расход энергии на измельчение.

4. Использование вертикальных роликовых мельниц в будущем может привести к радикальному изменению технологий на горно-обогатительных предприятиях, как с точки зрения капитальных затрат, энергосбережения, и охраны окружающей среды.

Список литературы

1. Губин Г.В. Ключевые проблемы горно-металлургического комплекса // *Металлургическая и горная промышленность*. – 2013. – 7. – С. 8-13.

2. Ширяев А.А., Головань В.И., Черный Л.М. Кинетика тонкого измельчения железных руд и выбор параметров барабанных мельниц // *Горный журнал*. – 1991. – №11. – С. 35-39.

3. Шупов А.П. Ударное воздействие шаров в мельнице // *Обогащение руд*. – 1962. – №4. – С.48-52.

4. Шестаков А.М., Губин Г.В. Повышение эффективности работы шаровых мельниц. // *Черная металлургия: Бюл. науч.-техн. информ.* – 1990. – №3. – С.43-44.

5. Ширяев А.А., Лисянский Л.Н., Головань В.И. Черный Л.М., Исследование закономерностей и обоснование различных режимов работы мельниц со свободным истечением пульпы. // *Горный журнал*. – 1993. – №12. – С.26-29.

6. G.V. Gubin, Yeliseyev A.K. and Shestakov A.M. Resource Saving Technology of Comminution // *XVIII International Mineral Processing Congress*. Sydney, 23-28 May, 1993. – P. 1321.

7. www.humboldt-wedag.de. KHD Humboldt Wedag AG. Mineral Processing.

8. Grinding test report of Shymanivske Iron Ore. Z5835. Test Center, Neuss, Dusseldorf, Germany. October 2013. Sheets: 10.

9. Обоганительная фабрика с короткой технологической схемой для размещения на борту действующего карьера. (Техническое решение от фирмы "Lins Construction Ukraine" LLC., Кривой Рог, 2015 г.)

© Головань В.И., Губин Г.В., 2014

*Надійшла до редколегії 25.10.2014 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*