

**Т.А. ОЛЕЙНИК**, д-р техн. наук

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

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБОГАЩЕНИЯ ГЕМАТИТОВЫХ РУД В УКРАИНЕ**

### *Проблема и ее связь с научными и практическими задачами*

Мировые прогнозные ресурсы железных руд оцениваются в 790,9 млрд т. и сосредоточены в месторождениях 98 стран. Общие запасы железных руд в мире составляют 464,24 млрд т; подтвержденные запасы составляют 206,9 млрд т. При этом на долю трех крупнейших стран производителей (КНР, Бразилия, Австралия) приходится около 65% от мирового объема производства. Но основным лидером в мировом производстве товарной железной руды является КНР. Содержание железа в промышленных рудах колеблется от 16 до 70%. Минимальное содержание железа в сырье, пригодном для доменной плавки – 55%. Руды, содержащие меньше 50% железа, обогащают до 62-67% железа. Мировое потребление товарных железных руд с учетом собственного производства, импорта и экспорта распределяется по странам весьма неравномерно. Главные тенденции и перспективы развития мировых рынков железорудного сырья тесно связаны с их полной зависимостью от состояния и конъюнктуры мировых рынков черных металлов. В этой связи следует отметить, что наблюдается снижение или прекращение добычи железной руды ведущими промышленными странами на своей территории и перевод металлургических заводов на импортное железорудное сырье. Кроме того, продолжается перенос экологически вредных производств металлургического комплекса в развивающиеся страны.

Следует отметить, что при снижении содержания железа в разрабатываемых месторождениях, ведет к необходимости расширения масштабов обогащения руд и увеличению масштабов их добычи

Поэтому, если задаться вопросом о перспективных разработках железорудных месторождений в XXI веке, то они связаны, прежде всего, с внедрением новых технологий в горнодобывающую промышленность или возможными изменениями существующих технологий производства товарной продукции. Украина сегодня имеет достаточные балансовые запасы железосодержащего сырья, а также производственные мощности и перспективы, необходимые для его добычи и переработки на высоком технологическом уровне.

### *Анализ исследований и публикаций*

В настоящее время Украина является седьмым по величине производителем железорудного сырья (ЖРС) в мире и наряду с Бразилией, Россией лидером по количеству железа в разведанных запасах руды (рис. 1). Государственным балансом в Украине руд в размере около 30 млрд тонн. Они сосредоточены в 52 месторождениях, из которых ныне разрабатываются 24. Кроме того, разведаны

## Загальні питання технології збагачення

запасы железных руд, объемом в около 10 млрд тонн, которые не включены в Государственный баланс. Таким образом, ресурсная база Украины позволяет не только обеспечить потребности страны, но и активно участвовать в экспорте железорудного сырья, а также продуктов его переработки на длительную перспективу.

Основная продукция, выпускаемая горнодобывающими предприятиями – богатые железные руды с содержанием железа 54-61%; концентрат с содержанием железа 64-66%; железорудные окатыши и агломерат. На рынке железорудного сырья Украины в настоящее время активно функционируют 8 украинских предприятий: ЗЖРК, КЖРК, Сухая Балка, ЮГОК, ЦГОК, СевГОК, ИнГОК, ПГОК. Кроме этого в экспорте и импорте ЖРС участвуют еще два украинских предприятия – бывшие р/у им. Кирова и Новокриворожский ГОК, которые входят в состав "Арселор Миттал Кривой Рог".

Структура производства железорудного сырья (рис. 2) за последние пять лет изменилась следующим образом. По-прежнему, наибольшую долю в производстве занимает концентрат, доля которого составляет около 50%. При этом доля окатышей составляет около 29%, а доля руды – около 18%, агломерата – около 3%.

Показатель производства товарного железорудного сырья, по оценкам аналитиков ДП "Укрпромвнешэкспертиза", за 2013 г. составил около 83 млн т, что или на 4,3% больше, чем за 2012 год. Об этом сообщает пресс-служба "Укрпромвнешэкспертизы" (УПВЭ).

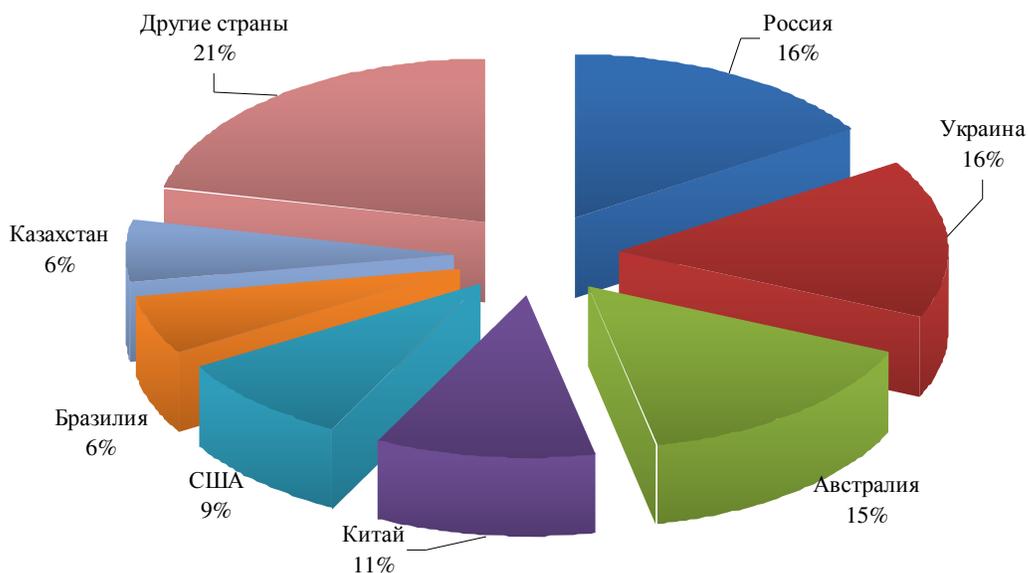


Рис. 1. Разведанные запасы железных руд

## Загальні питання технології збагачення

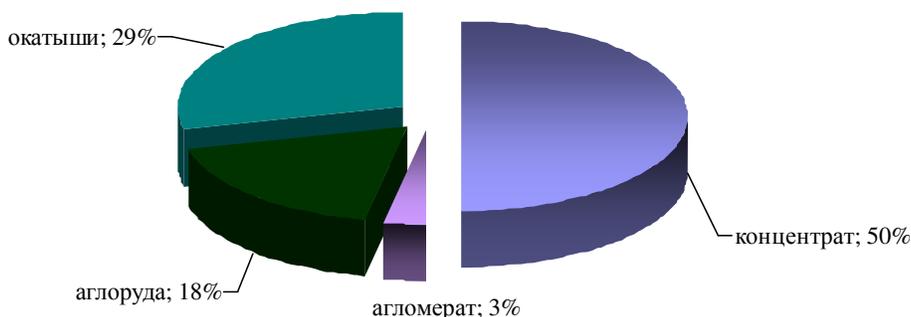


Рис. 2. Структура производства железорудного сырья в Украине

Значительная часть производимого в Украине сырья направляется на экспортные рынки, спрос на которых является более стабильным, чем на внутреннем рынке. Спрос на железорудное сырье на украинском рынке покрывается преимущественно за счет внутренних поставок отечественных горнодобывающих компаний, доля которых в последние пять лет составлял не менее 92% объемов рынка. Наибольшими поставщиками железорудного сырья на внутренний рынок Украины являются ИнГОК (около 22%), СевГОК (около 21%), НКГОК (около 17%), ЦГОК (около 7%) и ЮГОК (около 7%).

В настоящий момент конкурентоспособной на мировом рынке считается железорудная продукция, содержащая в руде 55% железа и более и в магнетитовом концентрате 67-68% железа при содержании кремнезема до 4-5%. В концентрате окисленных руд содержание железа находится на уровне 61-64%.

Что касается качественных показателей украинского товарного концентрата, то их уровень, оставаясь практически неизменным за последние годы, составляет в среднем по железорудным предприятиям 64-65% содержания железа, что на 3-4% ниже основных параметров аналогичной импортной продукции.

Особый интерес при рассмотрении ЖРС представляют гематитовые кварциты, которые за период эксплуатации горно-обогатительных комбинатов Кривбасса (более 60 лет) складывались в результате их попутной добычи с магнетитовыми рудами.

Запасы окисленных железистых кварцитов в Кривбассе составляют 12% от общих запасов руд, а их попутная добыча достигает 15-30% от объема добычи сырой руды. Так, по состоянию на начало 2013 г., разведанные запасы магнетитовых кварцитов всех пяти горно-обогатительных комбинатов составили около 5 млрд т, запасы богатых железных руд семи работающих шахт бассейна – около 1 млрд т, а прогнозные ресурсы окисленных кварцитов до глубины 1 км в границах горных отводов действующих горнодобывающих предприятий оцениваются в 50 млрд т.

Окисленные железистые кварциты являются продуктом выветривания магнетитовых кварцитов. В связи с близостью качественных показателей магнетитовых и окисленных железистых кварцитов, значительными ресурсами последних, присутствием их залежей в контурах отработки магнетитовых кварцитов и природно богатых железных руд – окисленные железистые кварциты изу-

## **Загальні питання технології збагачення**

чаються в настоящее время как перспективное железорудное сырье месторождений Криворожского бассейна.

Обогащение окисленных крупно- и тонковкрапленных железных руд в настоящее время осуществляется, в основном, на двух больших предприятиях в Бразилии и США. Это фабрика Кауе (Бразилия) производительностью 24 млн т на год, которая обогащает крупновкрапленную гематитовую руду с массовой долей железа 50%. Для обогащения используют 28 роторных полиградиентных электромагнитных сепараторов ДР-317 [1].

На сепараторы направляется материал крупностью 1-0 мм распределенный на два класса крупности -1+0,15 и -0,15 мм. Обогащения проводят в один или два приема при рабочем зазоре в пластинах сепаратора 2,8 мм. В результате переработки руды на фабрике получают три продукта: концентрат с массовой долей железа 67%, промпродукт с массовой долей 52-54% железа и хвосты (отходы) с массовой долей 8-10% железа.

Можно привести и другие подобные примеры из практики обогащения слабомагнитных железных руд с использованием высокоинтенсивных полиградиентных магнитных сепараторов. Их отличает главная особенность, а именно, на переработку направляется грубозернистый обесшламленный богатый материал.

Проблема обогащения средне- и тонковкрапленных окисленных руд заключается в том, что принятый наиболее распространенный метод обогащения с использованием традиционных барабанных сепараторов не пригоден для переработки тонко вкрапленных слабомагнитных окисленных кварцитов. С другой стороны, известен опыт работы предприятия Тилден в штате Миннесота (США) [2, 3]. На этом предприятии исходным сырьем являются окисленные такониты, для которых предлагались разные методы обогащения, в том числе и полиградиентную магнитную сепарацию, флотацию и обжиг-магнитный методы. Однако все они не дали положительных результатов. И лишь технология, разработанная Горным Бюро США, заключающаяся в применении селективной флокуляции в сочетании с обратной катионной флотацией, привела к успеху. В этом процессе используют такие реагенты как крахмал и амины. Трудность обогащения окисленных таконитов Тилдена заключается в том, что для раскрытия минералов, руду необходимо измельчать до 75-80% менее 0,020 мм, то есть превращать ее в материал с большим количеством шламов. Прецедентов в обогащении полезных ископаемых такой крупности механическим способом нет.

Гематитовые руды Кривбасса – это слабомагнитные окисленные железистые породы, средний минеральный состав которых приведен на рис. 3. Гематитовые руды содержат до 40-42% железа [4].

Ранее выполненные исследования по обогащению гематитовых руд Кривбасса касаются технологий обогащения, которые использовали обжиг-магнитный, магнитный, флотационный, гравитационный методы и их комбинации [5-9]. При обжиг-магнитной технологии гематитовое сырье после измельчения подвергалось восстановительному обжигу [5]. При этом происходит замещение гематита магнетитом:

## Загальні питання технології збагачення

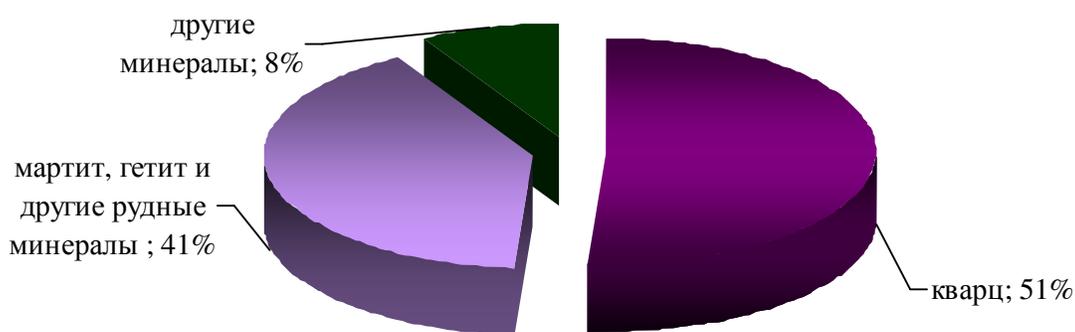


Рис. 3. Основные минеральные комплексы окисленных кварцитов Кривбасса

Магнетит в сростках с гематитом извлекался из продуктов восстановления методом магнитной сепарации в слабом поле.

От обжиг-магнитной технологии отказались вследствие высокой энергоемкости процесса и большого количества вредных выбросов.

В результате выполненных исследований по мокрой полиградиентной магнитной сепарации институтом "Механобрчермет" разработана технология обогащения гематитовых кварцитов ЮГОК и НКГОК для Криворожского горно-обогатительного комбината окисленных руд [6-9].

Технология включает две стадии измельчения и две стадии обогащения. В первой стадии измельчения предусматривается измельчение руды до крупности 70% класса минус 0,074 мм, а во второй стадии до 90,5% класса минус 0,045 мм. По этой схеме предусматривалось получать концентрат с массовой долей железа 62-62,5 % и извлечении металла 70%. Промышленные испытания такой технологии на Михайловском ГОКе с использованием крупнотоннажных проб руды 4, 5 и 6 железистых горизонтов ЮГОК и НКГОК позволили получить концентрат из 58,5-60,5 железа при извлечении металла 63%. Анализ продуктов обогащения показал, что основные потери железа приходятся на классы крупности менее 10-20 мкм, в первой стадии составило 54,9% а во второй стадии – 42,7%. Извлечение же металла в концентрат в классе минус 10 мкм составило 12,4%. Результаты испытания IV секции обогатительной фабрики ЦГОК по технологии КГОКОР показали, что массовая часть железа в концентрате составила 61% при извлечении 70%.

В следующих работах предусматривались разные схемы усовершенствования технологии магнитного обогащения, которые позволяли повысить качество концентрата до 62% железа, но при этом извлечение металла снизилось до 67,5%. Дальнейшие работы проводились в основном для улучшения качественно-количественных показателей обогащения в направлении использования гравитационного и флотационного методов разделения минеральных частиц.

В сравнении с проектной схемой КГОКОР наиболее высокий прирост массовой части железа в концентрате (2,9%) до 64,1% позволяет получить схема с обесшламливанием всей измельченной исходной руды и стадийным выделе-

## **Загальні питання технології збагачення**

нием концентрата. Это объясняется тем, что трудности обогащения слабомагнитных железных руд связаны с их усиленным ошламованием и закреплением тонких частей на поверхности как рудных, так не и рудных минералов при шаровом измельчении сырья. На рудных частицах, как правило, закрепляются нерудные тонкие частицы (кварц, глинистые примеси и др.), а на нерудных – рудные частицы (гидроксиды железа, гематит, мартит и др.).

Так, при уменьшении крупности измельчения в три раза (содержание класса минус 0,074 мм увеличивается от 30 до 95%), количество закрепленных рудных частиц крупностью минус 0,005 мм увеличивается от 2,10 до 9,83%, а частиц крупностью более 0,005 мм – от 1,10 до 6,72%. Для нерудных частиц: количество закрепленных зерен крупностью менее 0,005 мм изменяется от 2,60 до 13,19%, а для частиц крупнее 0,005 мм – от 0,31 до 6,14%.

При мокром обогащении в сильном магнитном поле (0,6-1,4 Тл) процесс налипания шламистых частей на поверхности крупных зерен интенсифицируется. Так, на рудных минеральных зернах в зависимости от крупности количество частиц менее 0,5 мкм достигает от 2,65 к 12,11%, а не рудных – от 3,14 к 15,48%.

При этом происходит снижение удельной магнитной восприимчивости рудной фазы до  $10,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/кг, и ее увеличение до  $6,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/кг для нерудной фазы. Следовательно уменьшается контрастность разделения минералов. Кроме того, шламы крупностью менее 0,010 мм сильно влияют на реологические свойства пульпы. Так при крупности измельченного продукта в конечной стадии (95% классу минус 0,074 мм) с изменением массой доли шламов от 4-5 до 20-25% вязкость растет в пределах от  $0,25 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^3$  Па с, то есть в 20 раз, что также отрицательно влияет на процесс обогащения тонковкрапленных гематитовых кварцитов. Кроме этого шламы крупностью менее 10 мкм практически не обогащаются.

Из анализа научно-исследовательских работ можно сделать вывод, что возможности улучшения качественно-количественных показателей обогащения еще не исчерпаны.

### *Постановка задачи*

Поэтому перед нами стояла задача разработки технологии обогащения средне- и тонковкрапленных гематитовых кварцитов Кривбасса с учетом современных требований к качеству подготовленного для металлургического передела железорудного сырья,.

### *Изложение материала и результаты*

На первом этапе рассматривалось решение актуальной проблемы: увеличения производства одного из видов конкурентоспособной товарной продукции – аглоруды на горно-обогатительных комплексах Кривбасса за счет повышения степени извлечения железа из некондиционного сырья, добываемого в шахтах и направляемого в отвал (4 железистый горизонт). Кроме этого исходным сырьем для исследований служили богатые гематитовые руды, присутствующие в карьерах по добыче магнетитовых руд. Например, объединенный 5 и 6 железистый горизонты Ингулецкого месторождения.

На кафедре обогащения полезных ископаемых ГВУЗ "Криворожский на-

## **Загальні питання технології збагачення**

ациональний університет" для получения аглоруды из руды объединенного 5 и 6 железистого горизонтов Ингулецкого месторождения в качестве основного метода обогащения принята сухая магнитная сепарация в сильном поле, создаваемом высокоэнергетическими системами из постоянных магнитов, изготовленных на основе сплавов Nd-Fe-B. При этом использованы аппараты барабанного и ленточного типа.

Эксперименты проводились на лабораторных сепараторах производства НПФ "Продэкология" (г. Ровно, Украина), позволяющих моделировать условия, приближенные к промышленным.

В результате исследований были сформулированы основные решения технологической схемы переработки, включающие операции доводки сырья до крупности -20 мм и его сухого магнитного обогащения в 2 приема с перечисткой немагнитного продукта основного приема. Осуществление последней операции с применением специально разработанного сепаратора с параметрами магнитного поля и конструктивными особенностями, направленными на доизвлечение кондиционных, но еще менее магнитных частиц, позволяет существенно повысить выход готовой продукции.

Исходя из крупности руды, поступающей из карьера, стало очевидным применение схемы рудоподготовки, включающей 2 стадии дробления в открытом цикле. По результатам выполнения укрупненных испытаний, имитирующих непрерывный процесс, определены данные для расчета технологических показателей разработанной схемы (рис 4).

В среднем они сводятся к следующему. Из сырья с содержанием железа 46,6% выделяются: аглоруда (Fe=55,19%) с выходом 40,32% и промпродукт, содержащий 40,8% железа, который далее рекомендуется на дальнейшее измельчение и обогащение.

Для дообогащения гематитового промпродукта (рис 5) рекомендуется щадящая технология измельчения и классификация измельченного продукта на две фракции, которые направляются далее на две технологические линии гравитационную и магнитную в сильных полях.

Такое технологическое решение позволяет получить кондиционный гематитовый концентрат с массовой долей железа 64,69%. Сквозное извлечение железа в товарные продукты при такой схеме составило 73,6%.

## Загальні питання технології збагачення

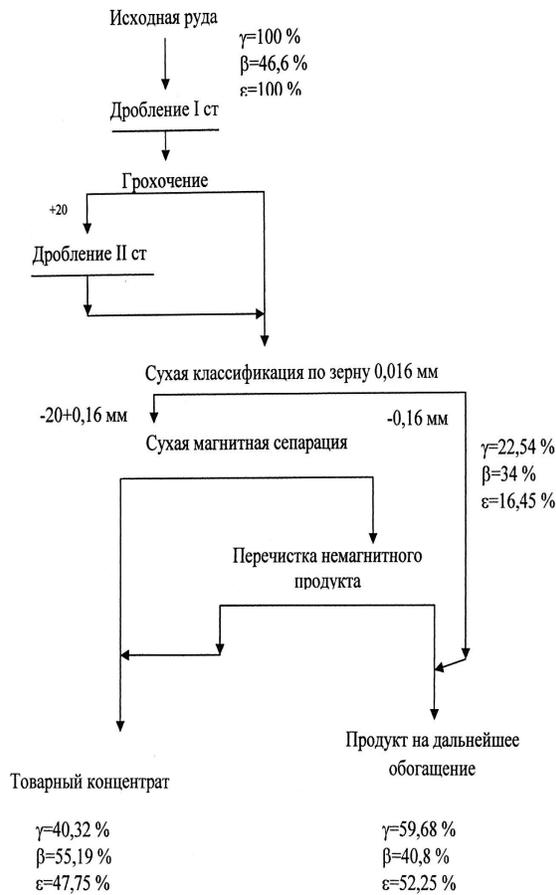


Рис. 4. Схема сухой магнитной сепарации гематитовой руды 5 и 6 железистых горизонтов Ингулецкого месторождения

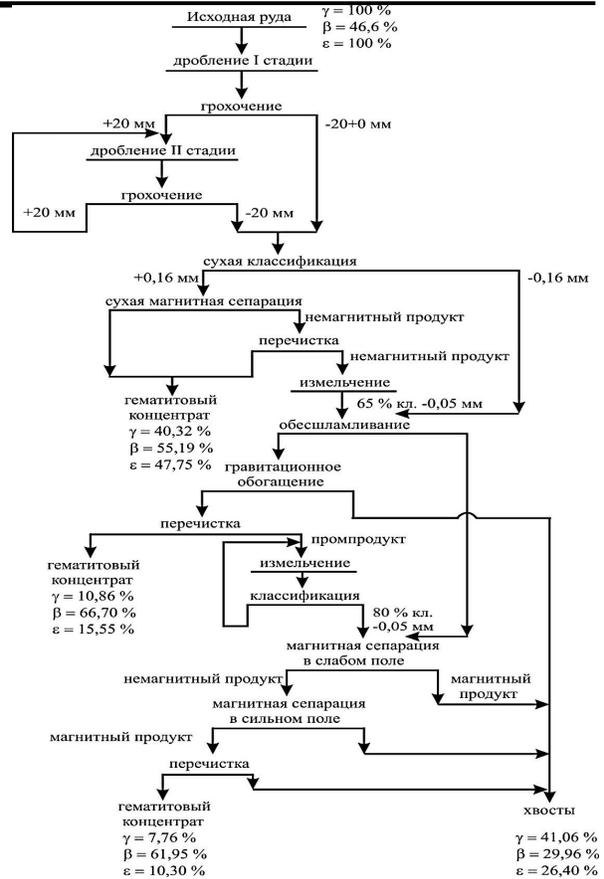


Рис. 5. Технологическая схема обогащения гематитовых руд с гравитационно-магнитными методами доводки немагнитного продукта СМС

Альтернативным вариантом доработки немагнитного промпродукта СМС является схема (рис 6) с использованием только магнитной сепарации в сильных полях. Такое технологическое решение позволило получить гематитовый концентрат с массовой долей железа 62,32%. Сквозное извлечение железа в товарные продукты при такой схеме составило 80,49%.

Кроме описанных выше технологий доработки промпродукта мокрыми методами в Криворожском национальном университете разработана технология его сухого обогащения. Технология предусматривает измельчение сырья в шаровой мельнице с вентилируемым контуром. Тонкоизмельченный продукт от воздушно-проходного сепаратора транспортируется сначала в магнитный сепаратор трубного типа, где и происходит выделение концентрата, а промпродукт направляется на перечистку. Перечистка происходит в двух последовательно установленных высокоинтенсивных циклонных магнитных сепараторах с получением на них концентрата с массовой долей железа 64% и хвостов. Запыленный воздух проходит очистку от твердых частиц и после этого возвращается в процесс.

## Загальні питання технології збагачення

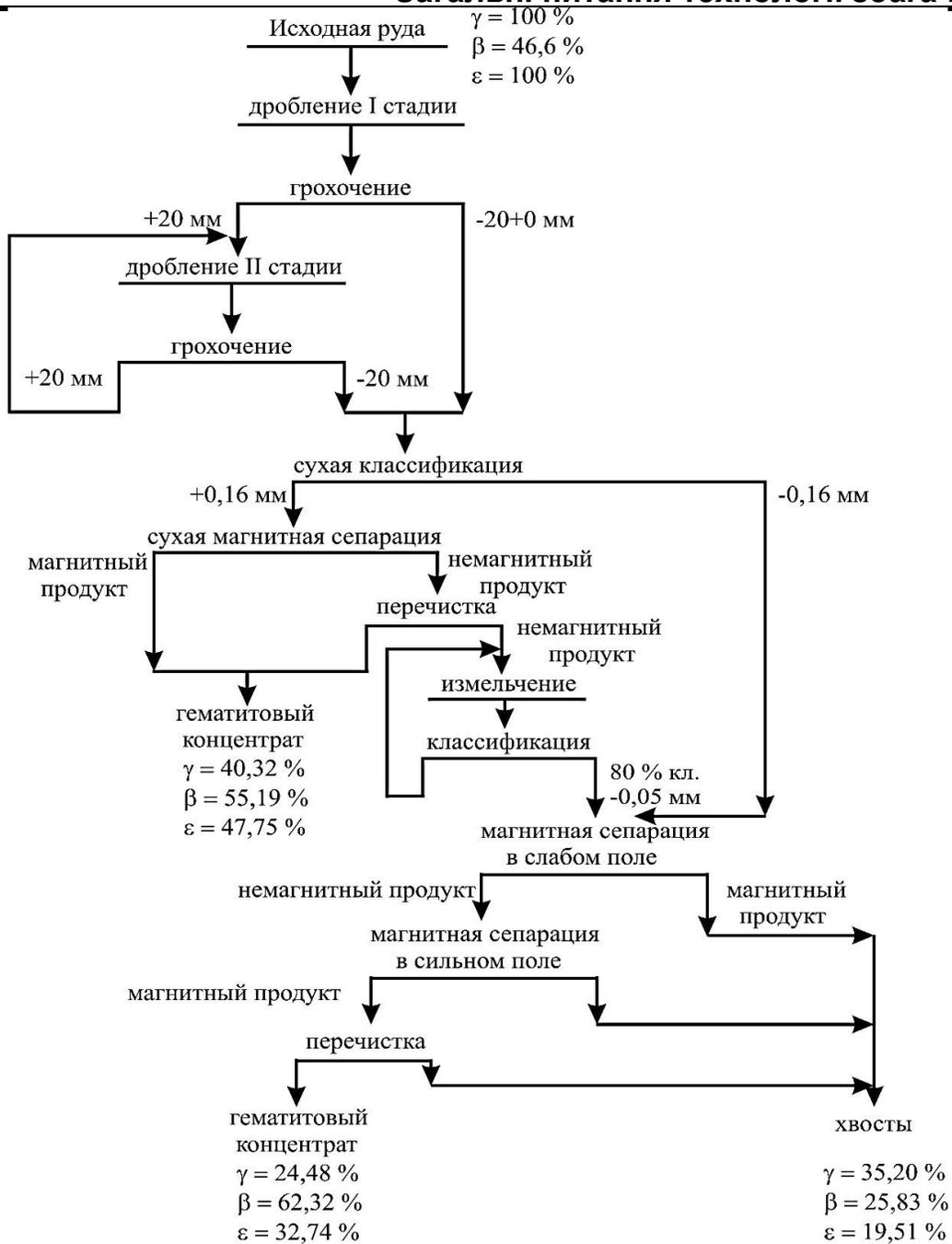


Рис. 6. Технологическая схема обогащения гематитовой руды с использованием магнитных методов

### *Выводы и направления дальнейших исследований*

В заключение хотелось бы отметить, что на ГОКе будущего, безусловно, должен быть внедрен комплекс новейших технологических и экологических решений, таких как сгущение и специальное складирование хвостов, полный водооборот, попутное производство строительных материалов (щебень, песок, и др.).

Внедрение новых технологий с использованием сухой магнитной сепара-

## **Загальні питання технології збагачення**

ции позволит устойчиво получать высококачественные концентраты, а также уменьшить фронт измельчения и обогащения не менее чем на 15-20% от исходного, что позволит уменьшить эксплуатационные и капитальные затраты более чем на 30% и станет мощным технологическим резервом развития отрасли.

### **Список литературы**

1. Бартник Е.А., Васмут Г.Д. Обогащение мартитизированной железной руды с применением высокоинтенсивных сепараторов Джонс, работающих в мокром режиме. // *Erzmetall.* – 1985. – №5. – Р. 243-249.
2. Обогащение железных руд новым способом на комбинате TILDEN. Villar James W., Dawe Gilbert A. The Tilden mine. A new processing technique for iron ore. "Mining Congr. J.", 1975. – 61, № 10. – № 40-48.
3. Горнорудное предприятие Tilden отмечает 25-летие производства окатышей. Tilden Mine Marks 25 years of pellet production // *Skill. Mining Rev.* – 1999. – 88, № 50. – Р. 9-10.
4. Смірнов О.Я., Євтехов В.Д., Євтехов Є.В. Мінералогічне обґрунтування оптимальної технології збагачення гематитових кварцитів Валявкинського родовища Криворізького басейну // *Геолого-мінералогічний вісник Криворізького технічного університету.* – 2011. – №1 (25). – С. 38-50.
5. Обогащение обожженных руд на реконструированной секции обогатительной фабрики ЦГОКа / П.П. Юров, Г.В. Губин, Б.М. Малый и др. // *Черная металлургия: Бюл. Науч.-техн. информ.* –1970. – №9. – С. 22-23.
6. Губин Г.В., Богданова И.П., Лукьянчиков И.Н. О рациональной технологии обогащения окисленных железистых кварцитов // *Обогащение руд черных металлов: Сб. науч. Тр.* – 1976. – Вып. 5. – С. 81-88.
7. Малый В.М., Ганзенко Т.Б., Титлянов Е.А. Разработка технологии магнитного обогащения окисленных железных руд // *Обогащение слабомагнитных руд черных металлов.* – М.: Недра, 1984. – С. 12-16.
8. Промышленные испытания технологии магнитного обогащения окисленных кварцитов Кривбасса / Г.Ф. Сусликов, В.М. Малый, Т.Б. Ганзенко и др. // *Обогащение слабомагнитных руд черных металлов: Сб. науч. тр. ин-та Механообрчермет.* – М.: Недра, 1984. – С. 16-22.
9. Ширяев А.А., Величко Ю.В., Ботвинников В.В. Особенности технологии подготовки и обогащения окисленных железистых кварцитов со стадийным выделением концентрата.// *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2005. – №4.– С. 86-88.

© Олейник Т.А., 2014

*Надійшла до редколегії 24.02.2014 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*