

УДК 622.765:788

**ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ НА МИХАЙЛОВСКОМ ГОКЕ**

**А. В. Варичев¹, А. А. Угаров¹, Н. Т. Эфендиев¹, С. И. Кретов²,
А. А. Лавриненко³, А. А. Солодухин⁴, П. В. Пузаков²**

¹ООО УК “Металлоинвест”, E-mail: a.varichev@metalloinvest.com,

Рублевское шоссе, 28, 121609, г. Москва, Россия

²ПАО “Михайловский ГОК”, E-mail: postfax@mgok.ru,

ул. Ленина, 21, 307170, г. Железногорск, Россия

³Институт проблем комплексного освоения недр РАН,

E-mail: lavrin_a@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

⁴ООО “НПВП ТОРЭКС”, E-mail: A.soloduhin@torex-npvp.ru,

ул. Основинская, 8, 620041, а/я № 169, г. Екатеринбург, Россия

Изложены основные особенности рудной базы и пути развития процессов переработки железорудного сырья на Михайловском ГОКе. Обоснованы новые подходы к процессу дезинтеграции руды и возможности совершенствования процесса сухой магнитной сепарации неокисленных железистых кварцитов. Рассмотрены направления флотационной доводки магнетитового концентрата, полученного из неокисленных железистых кварцитов мокрой магнитной сепарацией, по схеме с замкнутым и открытым циклом процесса, а также обратная катионная флотация гематитового концентрата из хвостов мокрой магнитной сепарации. Представлены технические решения, обеспечивающие создание энергосберегающей конвейерной обжиговой машины МОК-1-592 и технологии получения железорудных окатышей различного назначения.

Железистые кварциты, флотация, железорудные окатыши, фабрика окомкования, обжиговая машина МОК-1-592

DOI: 10.15372/FTPRPI20170516

Руды Михайловского месторождения по своим минералогическим и текстурно-структурным свойствам относятся к одним из самых сложных и разнообразных. На месторождении выделены железные руды трех геолого-промышленных типов: богатые, не требующие обогащения, окисленные и неокисленные кварциты, требующие обогащения.

Основное железорудное сырье Михайловского ГОКа (МГОК) — неокисленные железистые кварциты. Эти руды, в отличие от ряда крупных месторождений железистых кварцитов Курской магнитной аномалии (Стойленское, Лебединское, Коробковское) и других регионов России (Костомукшское, Оленегорское и пр.), характеризуются высокими прочностными, абразивными и низкими технологическими свойствами. Им присущи незначительные колебания содержания железа общего, низкое количество вредных компонентов (сотые и тысячные доли процентов серы и фосфора) и большая (от 16 до 30 %) изменчивость по массовой доле железа магнетитового. Минеральный состав рудной шихты неокисленных кварцитов МГОК отличается тем, что лишь около половины массовой доли железа в шихте приходится на сильномагнитные минералы (магнетит).

Особенностью магнетитового концентрата, получаемого из неокисленных кварцитов Михайловского месторождения методом мокрой магнитной сепарации, является невысокая массовая доля железа общего и наличие широкого спектра элементов-примесей. В силу этих причин магнетитовый концентрат по своей металлургической ценности, определяемой совокупностью содержания железа и диоксида кремния, не соответствует требованиям к исходному сырью для производства высококачественных окатышей и последующей металлизации. Сложившиеся тенденции в металлургии показывают, что наиболее предпочтительны в качестве сырья доменные окатыши с высокой массовой долей железа общего 65–66 % и низкой массовой долей диоксида кремния 4.0–4.5 %, а технология прямого восстановления железа требует еще более низкой массовой доли диоксида кремния на уровне 2.5–3.0 %.

Цель проводимых на МГОК исследований — совершенствование комбинированной технологии получения высококачественных концентратов железной руды и железорудных окатышей для прямого получения стали.

В условиях МГОК вопрос повышения эффективности технологии переработки руды начиная с дробления стоял постоянно в связи с необходимостью увеличения объемов перерабатываемого сырья, а также ростом доли труднообогатимых и трудноизмельчаемых кварцитов, что влечет за собой увеличение выхода надрешетного продукта грохочения и, как следствие, загрузки дробилок мелкого дробления. Дробление железистых кварцитов на МГОК осуществляется в четыре стадии с предварительным грохочением среднего и мелкого дробления в открытом цикле. Данная технология позволяет получать продукт крупностью –25 мм со средневзвешенным размером куска 9.6 мм и массовой долей класса +25 мм 1.5 %. Как показали исследования процессов дезинтеграции руды, качество магнитного и флотационного концентратов может быть повышено за счет селективного раскрытия основных минеральных компонентов при дроблении руды в слое объемного сжатия, характерном для измельчающих валков высокого давления (ИВВД), которые на стадии мелкого дробления продемонстрировали высокую эффективность дезинтеграции руды [1, 2].

Анализ мировых тенденций проектирования и практики эксплуатации новейших фабрик, в технологиях которых задействованы ИВВД, многочисленные тесты по дробимости руд в ИВВД малых типоразмеров доказывают их технологическую и экономическую эффективность, особенно для трудноизмельчаемых руд, к которым относятся железистые кварциты Михайловского месторождения. ИВВД могут использоваться в замкнутом цикле с грохотами для получения готовых продуктов крупностью менее 8 мм и в открытом цикле в операциях дораблевания продуктов дезинтеграции. В настоящее время на МГОК начата работа по комплексному изучению исходной руды на возможность применения, выбора типоразмера и разработки технологической схемы рудоподготовки с помощью ИВВД, которые повысят селективность последующего сухого магнитного обогащения.

Целесообразность технологии сухой магнитной сепарации (СМС) обусловлена сложным вещественным составом рудной шихты, поступающей на обогатительный передел. На основе теоретического и экспериментального обоснования взаимосвязи режимов и эффективности СМС с гранулометрическим, минералогическим составом и свойствами бедных гематитсодержащих магнетитовых кварцитов, включая их влажность, внедрена технологическая схема СМС дробленой руды, поступающей на мельницы первой стадии измельчения. Для решения этой задачи усовершенствован сепаратор ПБКС-90/150 с центробежным режимом и повышенной интенсивностью магнитного поля на основе магнитной системы из высокоэнергетичных редкоземельных металлокерамических магнитов Nd–Fe–В [3]. При этом хвосты сепарации используются для получения строительного щебня [4].

С целью повышения эффективности процесса сухого магнитного обогащения проведены исследования влияния скорости вращения барабана сепаратора, изменяемой с помощью частотного регулятора, на технологические показатели. Установлено, что возможно увеличить прирост железа магнетитового в промпродукте на 1% и выход хвостов СМС на 3–6% при неизменном уровне потерь с хвостами. Это позволяет без снижения качества конечного концентрата усилить нагрузку по исходной руде и получить дополнительный объем концентрата. В результате на дробильно-обогатительном комплексе (ДОК) комбината все сепараторы СМС оснащены частотными преобразователями для оперативного управления процессом разделения минералов.

Между тем технология обогащения неокисленных железистых кварцитов базируется на методе мокрой магнитной сепарации сильномагнитных минералов. Однако получаемого качества концентратов (65–66% Fe) недостаточно для производства из них металлizedанного продукта. Для получения качественных концентратов на МГОК реализована и совершенствуется технология флотационного дообогащения магнетитового концентрата.

Отечественные и зарубежные ученые считают флотацию наиболее эффективным методом повышения качества железорудного концентрата, особенно для предприятий, имеющих сложное в переработке исходное сырье, как на Михайловском месторождении [4]. Ранее выполненные исследования (МГОК, Механобрчермет, Механобр, Белмеханобр) убедительно показали, что содержание железа в концентратах до 69.8% (кремнезема 3.0%) может быть достигнуто только с использованием флотационного метода обогащения. При этом обратная катионная флотация по сравнению с другими способами характеризуется более высокой селективностью, скоростью и наименее чувствительна к солям жесткости.

Для флотационной доводки магнетитового концентрата на МГОК разработаны и проверены схемы с замкнутым и открытым циклом процесса [5]. Первоначально комплекс испытаний был направлен на флотационную доводку концентрата в замкнутом цикле. Технологическая схема доводки включала: основную флотацию в замкнутом цикле (с подачей в процесс камерного продукта контрольной флотации); перечистную флотацию камерного продукта основной флотации; контрольную флотацию пенных продуктов основной и перечистной флотации.

Флотация проводилась в щелочной среде, концентрат подавался с массовой долей железа общего 65–66%. Из нескольких типов катионных собирателей в результате исследований выбран амин РА-14 фирмы ТОМАН, основным компонентом которого является аминоэфир состава $R-O-CH_2CH_2CH_2-NH_2$. Этот собиратель считается биологически разлагаемым микроорганизмами. За 28 дней он распадается на 45%. В качестве депрессора минералов железа использовали щелочной кукурузный крахмал. В ходе полупромышленных испытаний получены исходные данные для разработки технологического регламента и проекта отделения флотации.

Отделение флотации ДОК имеет две линии, каждая из которых состоит из основной, перечистой и контрольной операций. Флотация материала осуществляется в современных колонных флотомашинах большого типоразмера с аэрацией тонкодисперсными пузырьками [6]. В основной и перечистой операциях установлены колонные машины объемом 174 м^3 , в контрольной флотации — машина объемом 116 м^3 . Обе линии имеют общую систему кондиционирования с крахмалом и две независимые системы контактирования с амином.

В процессе промышленных испытаний по производству флотационного концентрата отработан режим подачи питания заданного качества с учетом технологических свойств рудной шихты, уточнены рН пульпы в питании флотации, определен режим подачи воздуха и промывочной воды, подачи реагентов. Подобранный оптимальный технологический режим флотации позволил снизить расход собирателя в 2 раза по сравнению с рекомендуемым значением. По-

скольку флотационный концентрат отличался меньшей крупностью по сравнению с рядовым, внесены необходимые корректировки и в режим фильтрации. Результатом стало налаженное производство флотационного концентрата с массовой долей общего железа не менее 68.0 %, весовым выходом 85–90 % и стабильным содержанием влаги 10 %. Дальнейшим развитием флотации на ПАО «Михайловский ГОК» стало получение низкокремнеземистого концентрата с массовой долей диоксида кремния менее 3.0 %.

Анализ флотационных продуктов, полученных по замкнутой схеме, показал, что массовая доля железа общего в камерном продукте контрольной флотации не превышает 62–64 % из-за наличия бедных и богатых сростков железосодержащих минералов (табл. 1). Основная масса раскрытых свободных рудных зерен сосредоточена в классах крупности –0.044 мм, а значительное количество сростков рудных и нерудных минералов имеют массовую долю железа общего не более 28–35 %.

ТАБЛИЦА 1. Раскрытие минералов в камерном продукте контрольной флотации

Наименование	Класс, мм	Массовая доля Fe _{общ}	Выход, %	Содержание в продуктах по классам крупности, %				Коэффициент раскрытия		
				Свободные рудные	Сростки с содержанием рудного			Свободные нерудные	рудной фазы	нерудной фазы
					95–50	50–25	25–5			
Камерный продукт контрольной флотации	+0.044	50.8	4.9	0.6	1.2	0.8	1.0	1.3	—	16.0
	–0.044	63.2	95.1	80.9	3.0	2.2	2.5	6.5	—	—
	Итого	62.6	100.0	81.5	4.2	3.0	3.5	7.8	94.7	56.1

Возврат в основную операцию камерного продукта контрольной флотации, в который интенсивно извлекались шламистые частицы, приводил к повышенному пенообразованию и увеличению циркулирующей нагрузки, что нарушало селективность флотации. В целом разделительный процесс не соблюдался, пенный продукт контрольной операции (хвосты флотации) выделялся с высокой массовой долей железа. Сравнение результатов седиментационного анализа флотационных концентратов в замкнутом и открытом (с отдельной доводкой промпродуктов) циклах указывает на принципиальные трудности получения низкокремнистых концентратов с массовой долей диоксида кремния 3 % по технологической схеме с замкнутым циклом флотации.

Значительное увеличение массовой доли классов крупности менее 30 мкм во флотационном концентрате приводит к существенному ухудшению работы отделения фильтрации и повышению массовой доли влаги. При испытаниях флотационного концентрата в открытом цикле массовая доля влаги в среднем составила 9.93 %, а в замкнутом цикле — 10.35 %. Повышенное содержание влаги во флотационном концентрате замкнутого цикла объясняется существенно большей долей класса – 30 мкм. При этом исследования показывают, что в концентрате замкнутого цикла флотации отмечается повышенная удельная поверхность 1 839 см²/г против 1 660 концентрата открытого цикла флотации. Ввиду технологической сложности производства флотационного концентрата высокого качества по схеме с замкнутым циклом и неустойчивости ее работы, после проведенного комплекса промышленных испытаний и изучения продуктов флотации предложена технологическая схема получения флотационного концентрата в открытом цикле с доводкой промпродуктов.

В соответствии с принятой схемой камерный продукт контрольной флотации направлялся на доводочную операцию, предусматривающую выделение крупных классов более 0.044 мм с низкой массовой долей железа общего методом обесшламливания. Доводочная операция выполнялась в магнитном дешламаторе, песковый продукт которого направлялся на мокрую магнитную сепарацию с выделением концентрата и хвостов. В результате получали товарный концентрат с массовой долей железа общего не менее 65.1 % за счет выделения сростков рудных и нерудных минералов в слив магнитного дешламатора и в хвосты мокрой магнитной сепарации. По качеству концентрат доводочной операции соответствовал требованиям к рядовому концентрату и направлялся в существующую схему обогащения (рис. 1).

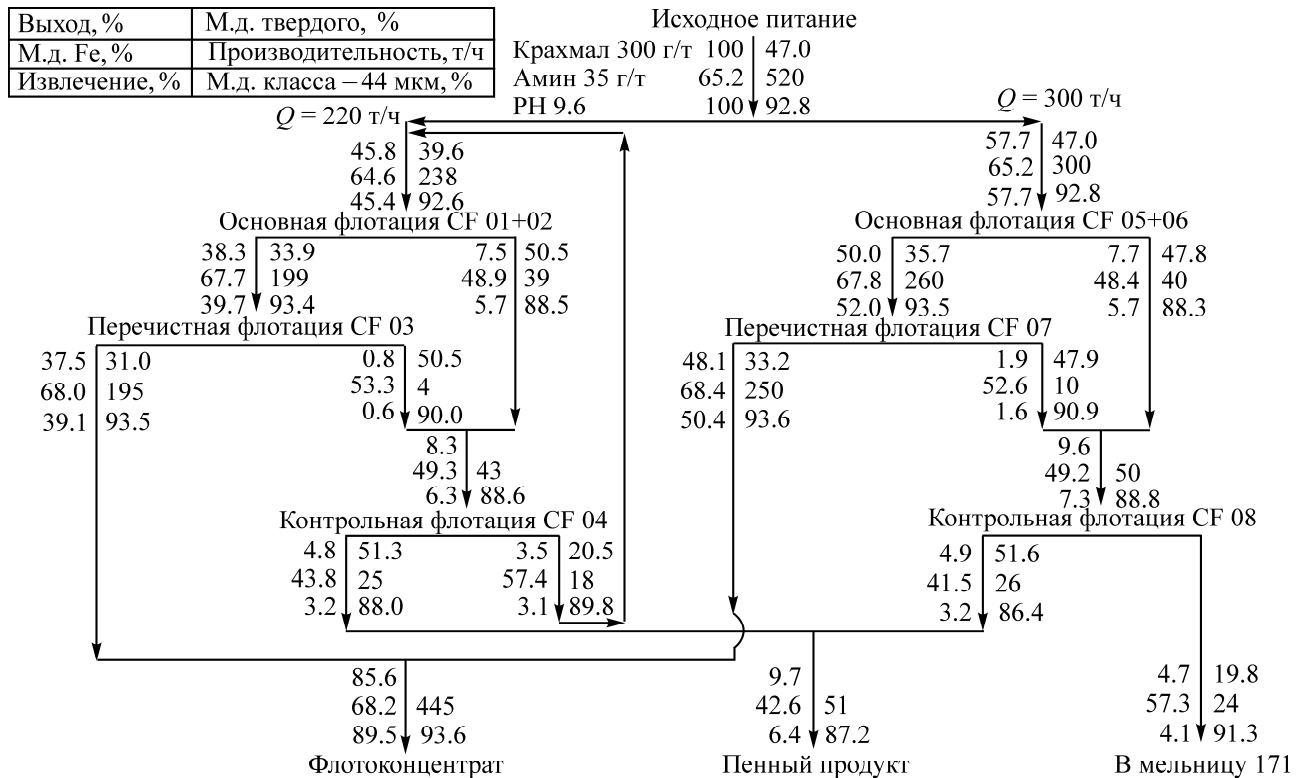


Рис. 1. Схема флотационного дообогащения магнетитового концентрата ПАО “Михайловский ГОК” в замкнутом и открытом циклах (М. д. — массовая доля)

Для схемы флотации определен оптимальный технологический режим процесса. Наибольшее извлечение железа достигается с собирателем РА-14, его расход составляет 45–60 г/т. Удельный расход крахмала 350–400 г/т исходного питания при показателе рН среды 9.4–9.6. Реализация процесса флотации в оптимальном режиме позволила увеличить производительность модуля по исходному питанию и концентрату на 60–80 т/ч, увеличить массовую долю железа в камерном продукте перечистой флотации на 0.5 %, снизить потери в хвостах флотации.

В процессе промышленной эксплуатации колонной флотации выявлены основные зависимости между параметрами процесса. Изучено влияние фактора изменчивости питания флотации, расхода воздуха и глубины пенного слоя. Установлено, что увеличение толщины пенного слоя не оказывает заметного влияния на качество концентрата, но снижает выход концентрата и извлечение в него ценного компонента. Увеличение расхода промывной воды в операции основной флотации способствует росту выхода концентрата, в контрольной флотации — снижению массовой доли железа общего в пенном продукте.

Результаты испытаний показали, что массовая доля железа общего и диоксида кремния во флотационном концентрате составляет 69.7 и 2.9 % соответственно. По технологии с открытым циклом процесс флотации протекает стабильно и за меньшее время. Получаемый концентрат пригоден для производства качественных доменных окатышей, а также может служить исходным сырьем для производства металлизированного продукта.

Для повышения эффективности флотационной технологии продолжают работы по оптимизации всех регулируемых параметров флотации: расхода воздуха, воды на промывку пены, значения рН среды, расходов депрессора и собирателя. Проведены флотационные исследования с применением новых высокоселективных реагентов-собирателей (рис. 2).

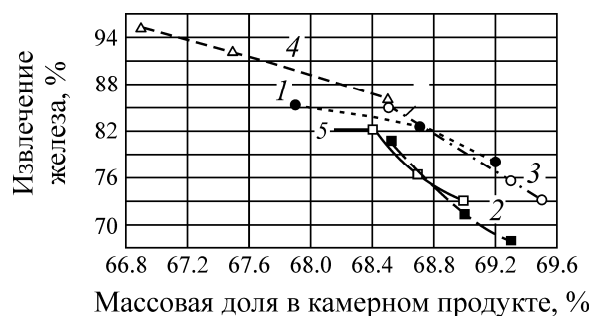


Рис. 2. Кривые обогатимости, полученные при использовании базового амина РА-14 и экспериментальных реагентов Лилафлот: 1 — 811М; 2 — Д819М; 3 — Д817М; 4 — Д826М; 5 — РА-14

По результатам опытов, направленных на определение технологических показателей в зависимости от расхода флотационных реагентов, а также построенных кривых обогатимости, выполнен сравнительный анализ перспективности экспериментальных реагентов относительно базового РА-14. Как следует из представленных данных, для получения флотационных концентратов с массовой долей железа более 69 % на опробуемых расходах перспективными оказались флотационные реагенты Лилафлот Д817М и 811М.

В целом разработанные режимы ведения технологического процесса флотации позволяют получать два сорта низкремнеземистых концентратов: с массовой долей диоксида кремния 5 и менее 3 %. Одним из направлений повышения эффективности управления технологией флотации стал ввод в эксплуатацию автоматизированной системы аналитического контроля, поставленной финской компанией Outotec. Система предназначена для оперативного контроля содержания массовой доли железа общего, твердого, класса –44 мкм и выполняет многие функции персонала (отбор проб, транспортировка, пробоподготовка). Обратная катионная флотация в машинах колонного типа использована также для доводки гематитового концентрата, полученного из хвостов мокрой магнитной сепарации, которых образуется на МГОК примерно 27 млн т в год.

Минералогические и гранулометрические исследования показали, что средний размер зерен гематита в хвостах мокрой магнитной сепарации составляет 30 мкм, плюсовые классы имеют низкое содержание железа за счет бедных сростков рудных и нерудных минералов, а минусовые классы сильно ошламованы и труднообогатимы. В связи с этим для оптимизации исходного питания флотационного обогащения удалены крупные сростки и шламы и получена пульпа с массовой долей 78–90 % класса –44 мкм и 25–37 % твердого. Из двух рассмотренных вариантов принята технологическая схема, включающая в себя основную и перечистную обратную катионную флотации. Для процесса применялась оборотная вода из хвостохранилища. Расходы реагентов, в среднем, составили для собирателя 120–150 г/т, депрессора 500–700 г/т, регулятора среды 120–160 г/т. Показатель рН среды флотации 9.6–10.2. Получен флотационный концентрат с массовой долей железа более 56 %.

Гематитовый концентрат обезвоживался на дисковых вакуум-фильтрах и далее смешивался с рядовым магнетитовым концентратом для последующего производства окатышей. Несмотря на низкое изначальное качество (около 56% железа общего), данный концентрат практически не оказывает негативного воздействия на производство окатышей, так как в процессе окомкования и при высокотемпературном обжиге не происходит окисления магнетита до гематита, а наличие органических примесей (п.п.п. 5.7%) повышает содержание железа в обожженных окатышах.

Многолетние исследования специалистов МГОКа легли в основу разработки технологии использования и переработки труднообогатимых окисленных железистых кварцитов (ОЖК) для увеличения объемов товарной продукции на 10 млн т в год с высокими качественными характеристиками. Окисленные железистые кварциты Михайловского месторождения развиты повсеместно и при разработке карьера добываются попутно с неокисленными кварцитами.

В 2014–2015 гг. проведены опытно-промышленные испытания по обогащению ОЖК по комбинированной магнитно-флотационной технологии с помощью высокоинтенсивной магнитной сепарации в условиях 14-й секции ДОК. Несмотря на сложность вещественного состава ОЖК как по гранулометрическим характеристикам, так и по минеральному составу, из окисленной руды с содержанием общего железа 40.7% и магнетитового 8.14% произведено 96.3 тыс. т концентрата с массовой долей железа 64.7%. Результаты испытаний подтвердили принципиальную возможность промышленного получения высококачественного гематитового концентрата из ОЖК.

Решающим этапом в производстве железорудного сырья является получение окатышей различного назначения. В связи с увеличением спроса на окатыши и значительным повышением цен на энергоносители реализованы различные мероприятия по увеличению производительности действующих обжиговых машин (ОМ) № 1 и № 2 и снижению удельных норм расходов энергоносителей. Сущность таких мероприятий заключается в усовершенствовании теплотехнических схем путем изменения соотношения зон ОМ, более рациональном использовании температурного режима, частичном изменении схемы газовых потоков с целью повторного применения тепла отходящих газов. В результате объем производства окатышей увеличен до 10 млн т в год при уменьшении удельного расхода газа на 34%.

Проведенный комплекс исследований на МГОК по совершенствованию технологии получения окатышей дал основу для создания оригинальной обжиговой машины конвейерного типа МОК-1-592 производительностью 5 млн т в год по обожженным окатышам, которая разработана по технологическому регламенту ООО «НПВП ТОРЭКС» с использованием современной схемы производства железорудных окатышей (рис. 3).

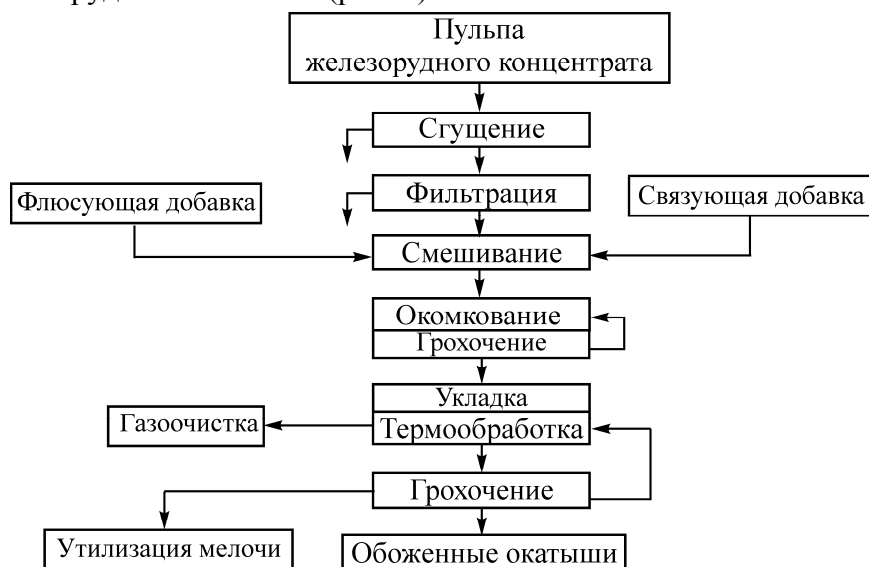


Рис. 3. Технологическая схема производства железорудных окатышей

Требования к технологии производства окатышей и к обжиговой машине сформулированы как комплекс следующих задач: 1) современные технические решения, обеспечивающие конкурентоспособные показатели производства, а также высокую удельную производительность; 2) низкая себестоимость производства (складывается из расхода энергоносителей и эксплуатационных расходов); 3) высокое и стабильное качество продукта (определенное для каждого конкретного потребителя, в том числе для последующей металлургии). Сравнительный анализ преимуществ и недостатков современных и перспективных тепловых схем ОМ для термообработки окатышей выявил основные направления их модернизации с целью повышения степени использования тепла и снижения расхода электроэнергии.

На основе современной теории тепломассообмена в слоевых агрегатах с использованием многолетних экспериментов на обжиговых машинах РФ и стран СНГ разработана математическая модель физико-химических и тепломассобменных процессов, протекающих в одиночной грануле заданного состава, в слое окатышей и металлоконструкциях обжиговых тележек [7, 8]. Методом математического моделирования исследованы особенности тепломассообмена в слое железорудных окатышей с учетом гранулометрического состава исходной шихты на обжиговых конвейерных машинах [9]. Выявлено наличие двух тепловых волн в слое, образуемых газом-теплоносителем из горна и тепловым источником за счет экзотермического эффекта реакции окисления магнетита. Управление температурными волнами позволяет оптимизировать температурно-фильтрационный режим по длине машины для минимизации расхода топлива на обжиг окатышей и улучшения их качества [8].

Особое внимание при проектировании технологической схемы производства уделено операции термической обработки сырых окатышей, для чего используется принципиально новая, не имеющая аналогов в мире теплотехническая схема [10]. Производительность обжиговой машины, определяемая высотой слоя укладки окатышей и скоростью ленты, ограничивается качеством исходных и обожженных окатышей. Качество исходных окатышей обуславливает высоту слоя, превышение которой приводит к ухудшению газодинамики и уменьшению скоростей фильтрации теплоносителя. Высота слоя ограничивается влажностью исходных окатышей (9.6–9.8%). Увеличение высоты при такой влажности повышает газодинамическое сопротивление слоя и ухудшает процесс сушки окатышей. Установлено, что высота слоя исходных окатышей на действующих обжиговых машинах № 1 и № 2 ПАО «Михайловский ГОК» находится на уровне 290–300 мм. На рис. 4 показана взаимосвязь влажности исходных окатышей и высоты слоя, выявленная из опыта работы обжиговых машин на окатышах с различной влажностью.



Рис. 4. Влияние влажности окатышей на высоту слоя их укладки

Характер такого влияния обусловлен тем, что более влажные окатыши имеют повышенную пластичность, которая создает условия для слипания в гроздь и сминания под нагрузкой верхних окатышей низа слоя. В процессе сушки увеличивается зона переувлажнения и трещинообразование. Все это повышает газодинамический коэффициент сопротивления слоя, вследствие чего снижается скорость фильтрации теплоносителя и ухудшается процесс сушки.

Высота слоя оказывает существенное влияние и на теплообмен в слое, а значит, на качество и производительность ОМ. Увеличение высоты сопровождается снижением скорости тележек, что вызывает уменьшение расхода топлива, но и производительность агрегата. Уменьшение высоты слоя и увеличение скорости тележек позволяет повысить производительность, но при этом увеличивает расход топлива. При высоком слое температура на границе слой–постель ниже, чем при низком слое, и степень завершенности физико-химических превращений определяется в большей мере временем (кинетикой процессов), а на низком слое при недостатке времени — температурой (термодинамикой процессов). Следовательно, высокий слой дает возможность увеличить время пребывания окатышей в зоне повышенных температур, что улучшает их качество.

Рассмотрен способ уменьшения переувлажнения слоя сырых окатышей на обжиговой машине с камерами предварительного подогрева (КПП). С помощью математической модели показана эффективность работы КПП при разных условиях и определены оптимальные параметры ее работы. Следует отметить, что в схеме технологического комплекса обжиговой машины МОК-1-592 (рис. 5) усовершенствованы технические решения и элементы тепловой схемы, опробованные на действующих ОМ № 1 и № 2 МГОК. К таким решениям относятся: оптимальное соотношение площадей технологических зон; разделение газопотоков по температурному потенциалу; максимальное использование теплоты обожженных окатышей и газов; повышение уровня автоматического управления работой МОК-1-592. Исследования показали, что трехсекционная зона сушки, переточная и газоходная системы позволяют в полной мере использовать температуру обожженных окатышей и уходящих газов. Технические характеристики обжиговой конвейерной машины МОК-1-592 приведены в табл. 2.

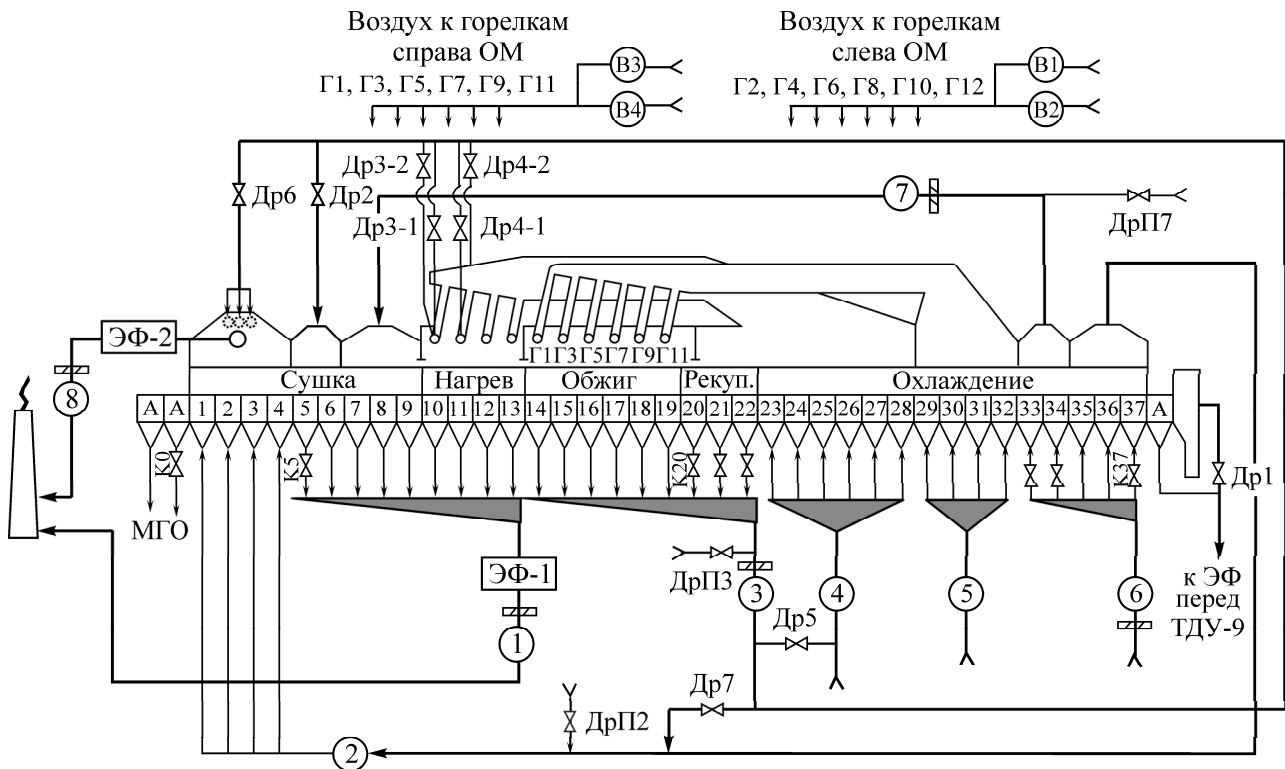


Рис. 5. Тепловая схема обжиговой машины МОК-1-592: 1–37 — вакуум-камеры; Г1–12 — газовые горелки; ЭФ — электрофильтр; А — аспирационные камеры; ЭФ — электрофильтр; ТДУ-9 — тягодутьевая установка (дымосос); К — коллектор; МГО — мокрая газоочистка

ТАБЛИЦА 2. Техническая характеристика МОК-1-592

Параметр	Доменные окатыши
Производительность, млн т/год	5
Производительность, т/ч:	
по сырым окатышам	740
по обожженным окатышам	630
Время работы машины в году, ч	7 920
Площадь технологических зон, м ²	592
Длина рабочей поверхности, м	148
Ширина рабочей поверхности, м	4
Площадь газовоздушной камеры (ГВК), м ²	16
Скорость движения обжиговых тележек, м/мин	1.5–4.5
Высота слоя донной постели, мм	100
Общая высота слоя окатышей, мм	450
Высота слоя аварийной постели, мм	300
Количество обжиговых тележек, компл.	233
Количество горелочных устройств, компл.	12
Зона сушки 1 (продувом):	
площадь, м ²	64
количество ГВК, компл.	4
температура над слоем окатышей, °С	40–50
Зона сушки 2 (прососом):	
площадь, м ²	40
количество ГВК, компл.	2.5
температура над слоем окатышей, °С	300–350
Зона сушки 3 (прососом):	
площадь, м ²	40
количество ГВК, компл.	2.5
температура над слоем окатышей, °С	750
Зона нагрева (прососом):	
площадь, м ²	64
количество ГВК, компл.	4
температура над слоем окатышей, °С	800–1150
Зона обжига (прососом):	
площадь, м ²	96
количество ГВК, компл.	6
температура над слоем окатышей, °С	1 250–1 300
Зона рекуперации (прососом):	
площадь, м ²	48
количество ГВК, компл.	3
температура над слоем окатышей, °С	1 000–1 150
Зона охлаждения 1 (продувом):	
площадь, м ²	96
количество ГВК, компл.	6
температура над слоем окатышей, °С	1 000–1 050
Зона охлаждения 2 (продувом):	
площадь, м ²	64
количество ГВК, компл.	4
температура над слоем окатышей, °С	800–850
Зона охлаждения 3 (продувом):	
площадь, м ²	32
количество ГВК, компл.	2
температура над слоем окатышей, °С	550–700
Зона охлаждения 4 (продувом):	
площадь, м ²	48
количество ГВК, компл.	3
температура над слоем окатышей, °С	450–200
Масса обжиговой машины, т:	4 055
масса загрузочного устройства УЗ-1, т	51.5
масса устройства для замены обжиговых тележек УЗТ-12, т	37
Мощность электродвигателей главного привода обжиговой машины, кВт	2 × 30

Термообработка окатышей проводилась в пяти технологических зонах: сушки, нагрева, обжига, рекуперации и охлаждения. Размеры их площадей выбирались с расчетом реализации оптимальных скоростей прогрева слоя окатышей в каждой зоне, поскольку медленный прогрев снижает производительность ОМ, а быстрый ухудшает качество обожженных окатышей [10]. Внедрена трехсекционная зона сушки [8], с помощью которой удалось интенсифицировать сушку окатышей и повысить производительность МОК-1-592.

Разделение газовых потоков по температурному потенциалу позволило более полно и целенаправленно подавать теплоноситель с требуемой температурой в технологическую зону. Для этого зона охлаждения поделена на четыре секции. При охлаждении слоя окатышей из каждой секции выходит теплоноситель с различной температурой. По переточной и газоходной системам различные по температуре теплоносители поступают в зоны сушки, нагрева, обжига и рекуперации. Высокотемпературные газы внутренней рециркуляции поступают посредством перепада давления по переточной системе, а низкотемпературные газы внешней рециркуляции транспортируются тягодутьевыми установками (ТДУ) по газоходной системе. Переточная система состоит из трех конусных футерованных трубопроводов — центрального и двух боковых [10]. По центральному переточному коллектору теплоноситель поступает в зону нагрева, по боковым — в зону обжига. Благодаря переточной системе для сжигания топлива требуется ограниченное количество инжекционных горелок и только в зоне обжига.

Максимальное использование теплоты обожженных окатышей и газов обусловлено, помимо газов внутренней рециркуляции, полнотой использования газов внешней рециркуляции с помощью газоходной системы. В дымовую трубу сбрасываются только низкотемпературные влажные газы из зоны сушки. Установка электрофильтров позволила довести степень очистки газов от пыли до 98 %.

Для каждой технологической зоны предусматривается индивидуальная ТДУ, обеспечивающая: более гибкое управление процессом в зоне; разделение газовых потоков по температуре и объему; высокую степень рециркуляции теплоносителей и сокращение количества сбрасываемых в атмосферу дымовых газов; уменьшение мощности и динамичную работу единичной тягодутьевой машины с высоким КПД в сети с меньшей емкостью; уменьшение диаметров газоходов и коллекторов [11].

Для стабилизации скорости газов предусматривается аэродинамическая форма переточных коллекторов. Для минимизации турбулентности потока газа места стыковки опускных патрубков форкамер с переточным коллектором выполняются под углом 45 °С. Патрубки газоздушных камер имеют направленную стыковку со сборными коллекторами конической формы. За счет более совершенной конструкции продольных уплотнений снижается доля подсосов наружного воздуха. Для футеровки МОК-1-592 применяются изоляционные материалы со значительно более низкой теплопроводностью, чем на действующих машинах.

Фактическое распределение температур на границе “слой – постель” во времени для ОК-520 (ОМ № 2) и МОК-1-592 приведено на рис. 6. Анализ данных показывает, что общее время термообработки на МОК-1-592 аналогично времени на ОК-520.

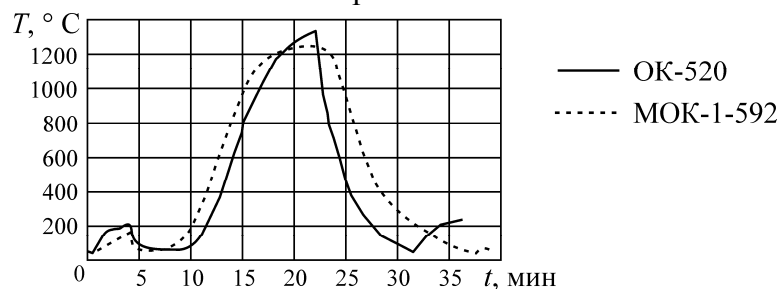


Рис. 6. Распределение температур на границе “слой – постель” обжиговой машины

На ОК-520 сушка слоя (достижение температуры 100 °С) заканчивается на 10-й минуте, на МОК-1-592 — за 8.5 мин, т. е. сушка слоя при текущих параметрах организована более эффективно. Процесс термообработки от начала зоны сушки продувом до конца зоны рекуперации на ОМ № 2 составляет 21.5 мин, на МОК-1-592 — 22 мин, т. е. практически одинаков. Однако за счет раннего окончания сушки на МОК-1-592 имеется больше времени для прогрева низа слоя. Так, температура 1200 °С по низу слоя на МОК-1-592 достигается к 17.5 мин, а на ОМ № 2 — лишь к 18.5 мин. Выдержка при температуре выше 1200 °С на ОМ № 2 составляет 4 мин, на МОК-1-592 — 5.5 мин.

Сравнение значений прочности внизу слоя по центру, там где выполнялись измерения температуры, для МОК-1-592 — 352.7 кг/ок. и для ОК-520 — 293.1 показывает, что тепловая схема новой машины позволяет при меньшем удельном расходе газа производить окатыши с более высокой прочностью (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Результаты определения прочности окатышей, кг/окатыш

Место отбора		МОК-1-592	ОК-520
Слой	верх	328.3	310.6
	середина	292.9	277.3
	низ	352.7	293.1
Донная постель		285.4	—
Среднее		314.8	293.7

В 2016 г. на МГОКе завершили эксплуатационные испытания оборудования технологического комплекса обжиговой машины МОК-1-592, которые подтвердили ее высокую эффективность. Основные результаты испытаний представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Основные технические показатели обжиговой конвейерной машины МОК-1-592 при производстве доменных окатышей

Показатель	Значение
Годовой объем производства окатышей, млн. т	5
Время работы машины в году, ч	7920
Производительность, т/ч:	
исходные окатыши	718
годные окатыши	632
Количество газоздушных камер, шт.	37
Высота слоя сырых окатышей, мм	350
Высота слоя донной постели, мм	100
Скорость движения обжиговых тележек, м/мин	4.2
Время термообработки окатышей, мин	37.0
Количество инжекционных горелок, шт.	12.0
Удельный расход природного газа, нм ³ / на 1 т обожженных окатышей	<10.0
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/ на 1 т обожженных окатышей	< 36.0
Удельный расход электроэнергии на ТДУ, кВт·ч/т	< 22
Удельные выбросы газов в дымовую трубу, нм ³ /т	1750
Прочность обожженных окатышей на сжатие, кг/окатыш	≥ 250

Как следует из представленных данных, в результате эксплуатационных испытаний достигнуты проектные показатели по всем параметрам.

ВЫВОДЫ

Использование на МГОКе усовершенствованной магнитно-флотационной технологии обогащения железистых кварцитов по схеме с открытым циклом флотации и доводкой промпродуктов позволяет получить концентрат с содержанием железа общего и диоксида кремния 69.7 и 2.9% соответственно. Данный концентрат пригоден для производства доменных окатышей повышенного качества, а также может служить исходным сырьем для производства металлургического продукта.

Гибкость реализованной на новой обжиговой конвейерной машине МОК-1-592 технологии открывает перспективы расширения видов и качества железорудных окатышей, повышения технико-экономических показателей их производства. В результате введения комплекса МОК-1-592 на МГОКе производство окатышей возросло в 1.5 раза. При этом существенно снижены энергетические затраты и вредные промышленные выбросы в окружающую среду. В настоящее время продолжаются работы по отработке технологии для вовлечения окисленных кварцитов в производство окатышей для доменного передела и металлургической, рассматривается программа поэтапного увеличения производительности МОК-1-592 до 22%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барнов Н. Г., Лавриненко А. А., Лусинян О. Г., Чихладзе В. В. Влияние метода дробления на процесс обогащения свинцово-цинковой руды // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 175–182.
2. Федотов П. К. Моделирование процесса разрушения руды в слое частиц под давлением // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 71–77.
3. Кретов С. И. Основные закономерности сухой центробежной магнитной сепарации железистых кварцитов // Горн. журн. — 2006. — № 6. — С. 3–4.
4. Кретов С. И., Губин С. Л., Потапов С. А. Совершенствование технологии переработки руд Михайловского месторождения // Горн. журн. — 2008. — № 7. — С. 71–74.
5. Лавриненко А. А., Игнатова Т. В., Шелепов Э. В. Совершенствование флотационной технологии повышения качества железных концентратов ОАО «Михайловский ГОК» // Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения, 19-24 сентября 2011, Верхняя Пышма). — Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть. — 2011. — С. 399–402.
6. Dedelyanova J. and Metodiev M. Innovative aeration in column flotation, XXIII JMPC, Istanbul, Turkey, 2006, Vol. 1. — P. 834–838.
7. Боковиков Б. А., Брагин В. В., Малкин В. М., Найдич М. И., Солодухин А. А. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата // Сталь. — 2010. — № 9. — С. 33–37.
8. Боковиков Б. А., Брагин В. В., Евстюгин С. Н. и др. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине (математическое моделирование). — Екатеринбург: Типография «Уральский центр академического обслуживания», 2013. — 200 с.
9. Gillot B., Rousset A., and Dupre G. Influence of crystallite size on the oxidation kinetics of magnetite, I. Solid State Chem., 1978, Vol. 25, No 3. — P. 263–271.
10. Брагин В. В., Боковиков Б. А., Найдич М. И., Груздев А. И., Швыдкий В. С. О взаимосвязи производительности обжиговой машины и удельного расхода топлива // Сталь. — 2014. — № 8. — С. 38–42.
11. Абзалов В. М., Брагин В. В., Вяткин А. А., Евстюгин С. Н., Лелеко С. Н. Разработка обжиговой конвейерной машины нового поколения // Сталь. — 2008. — № 12. — С. 13–14.