

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СЕРТИФИКАЦИИ  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ «ВИМС»



Научный совет по методам  
технологических исследований

Методические рекомендации № 135

**ПЕРЕРАБОТКА ВЫСОКОЖЕЛЕЗИСТЫХ ХРОМОВЫХ РУД  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБЖИГ-МАГНИТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Москва, 2019 г.

РАЗРАБОТАНЫ: Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»)

СОСТАВИТЕЛИ: Чепрасов И.В., Ермолов В.М., Кологриев К.А., Безносков В.Г.

РАССМОТРЕНЫ И ПРЕДСТАВЛЕНЫ К УТВЕРЖДЕНИЮ: Научным советом по методам технологических исследований (НСОМТИ), протокол № 5 от 15 ноября 2019 г.

Председатель НСОМТИ

Курков А.В.

Ученый секретарь НСОМТИ

Соколова В.Н.

УТВЕРЖДЕНЫ: Федеральным научно-методическим центром лабораторных исследований и сертификации минерального сырья «ВИМС» (ФНМЦ)

Руководитель ФНМЦ «ВИМС»:

Рогожин А.А.



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.....	5
2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ МИНЕРАЛОВ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХРОМОВЫХ РУД.....	5
3. СВОЙСТВА ХРОМОВЫХ РУД, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ ОБОГАЩЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКУЮ ПЕРЕРАБОТКУ КОНЦЕНТРАТОВ.....	7
3.1. Свойства хромовых руд, влияющие на их обогатимость методами радиометрической сепарации.....	7
3.2. Свойства хромовых руд, определяющие способы их рудоподготовки.....	8
3.3. Свойства хромовых руд, влияющие на их обогатимость гравитационными методами.....	8
3.4. Свойства хромовых руд, влияющие на их обогатимость магнитными методами.....	8
3.5. Флотационные свойства хромовых руд.....	9
3.6. Свойства хромовых руд, влияющие на процесс выплавки углеродистого феррохрома.....	9
4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЖИГ-МАГНИТНОГО СПОСОБА ПЕРЕРАБОТКИ ХРОМИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕЛЕЗИСТОСТИ.....	11
5. АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ.....	12
5.1. Оборудование для изучения физико-механических свойств и обогащаемости хромовых руд различными методами.....	12
5.2. Оборудование для высокотемпературного обжига и магнитной сепарации.....	13
6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	15
6.1. Подготовка проб к исследованиям.....	16
6.2. Порядок выполнения исследований для получения концентратов.....	17
6.3. Порядок выполнения исследований по обжиг-магнитной переработке концентратов.....	19
6.4. Порядок выполнения исследований по пирометаллургической переработке немагнитной фракции после обжига.....	21
6.5. Анализ полученных результатов.....	22
6.6. Оформление результатов.....	22
7. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.....	22
8. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОЖЕЛЕЗИСТЫХ ХРОМОВЫХ РУД.....	24
8.1. Методика расчета основных показателей эффективности.....	24
8.2. Описание методологии расчета инвестиционных и эксплуатационных затрат.....	26
ЛИТЕРАТУРА.....	28
Приложение 1. Пример расчета состава шихты.....	29
Приложение 2. Применение обжиг-магнитной технологии переработки хромитовых концентратов повышенной железистости с получением стандартного феррохрома.....	31
Приложение 3. Определение экономической эффективности переработки высокожелезистых хромовых руд с получением стандартного феррохрома.....	39

## ВВЕДЕНИЕ

Качество хромового сырья зависит от номенклатуры выпускаемой продукции и регламентируется существующими техническим условиям или требованиями заказчика. Основным требованием к хромовому сырью при выплавке из него углеродистого феррохрома является его соответствие следующим критериям:

- необходимость поддержания отношения  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  не менее 3;
- содержание оксида хрома в концентратах должно быть не менее 40 %;
- отношение оксида магния к оксидам алюминия и кремния в конечном шлаке должно быть не менее 1:1:1.

Если последние два параметра влияют больше на технологию плавки и расходные показатели, то первый параметр оказывает влияние на качество феррохрома. Однако большинство руд России и получаемых из них концентратов имеют отношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  менее 3.

Перспективной технологией переработки некондиционных хромовых руд и концентратов является метод восстановительного обжига с последующей магнитной сепарацией получаемых продуктов.

## 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящие методические рекомендации предназначены для работников предприятий и организаций, осуществляющих свою деятельность в сфере недропользования независимо от их ведомственной принадлежности и форм собственности. Методические рекомендации направлены на обеспечение пользователей информацией по технологии переработки низкокачественных хромовых руд, а также для оценки возможности получения из них стандартного феррохрома, которая необходима при проведении лабораторных и укрупненно-лабораторных исследований, с целью принятия решений о продолжении или прекращении геологоразведочных работ.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ МИНЕРАЛОВ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХРОМОВЫХ РУД

Из более 20 хромсодержащих минералов в промышленном отношении важны только хромшпинелиды, которые служат в настоящее время единственным источником получения металлического хрома и его химических соединений.

В группе хромшпинелидов с общей формулой  $(\text{Mg,Fe})_2 + (\text{Cr,Al,Fe})_{23} + \text{O}_4$  наибольший интерес представляют следующие минеральные виды: магнохромит  $(\text{Mg,Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$ , хромпикотит  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$ , алюмохромит  $(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$ , субферрихромит  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Fe})_2\text{O}_4$  и, в меньшей степени, субферриалюмохромит  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Fe,Al})_2\text{O}_4$ . Содержание оксидов в разновидностях хромшпинелидов колеблется в широких пределах:  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  2–67 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2–65 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0–41 %,  $\text{FeO}$  10–30 %,  $\text{MgO}$  1–20 %. Примесными компонентами являются  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  (не более 0,3 % каждого);  $\text{NiO}$ ,  $\text{CoO}$  (не более 0,4 % каждого);  $\text{MnO}$  (не более 0,7 %).

По условиям образования выделяются эндогенные, экзогенные и техногенные месторождения хромовых руд (таблица 1).

По составу рудного хромшпинелида месторождения хромовых руд подразделяются на высокохромистые, глиноземистые и высокохромистые повышенной железистости [1].

Основной технологической проблемой при обогащении и переработке хромовых руд является низкое (ниже 3) соотношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  в рудах и концентратах, которое не позволяет получить высококачественный товарный продукт (высокоуглеродистый феррохром), который соответствует требованиям ГОСТ 4757-91 [2].

## Геолого-промышленные типы хромитовых месторождений

Геолого-промышленный тип	Основные промышленные типы руд	Минеральный состав руд	Содержание Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в балансовых запасах, %	Объекты	
				Месторождения	Перспективные объекты
Эндогенный (стратиформный)	Металлургический, химический	Хромшпинелид, оливин, пироксен, плагиоклаз	22–37	Бушвельд (ЮАР), Великая Дайка (Зимбабве), Кеми (Финляндия), Стиллоутер (США), Аганозерское, Сопчеозерское, Сарановское (РФ)	Большая Варака
Эндогенный (альпийнотипный)	Металлургический	Хромшпинелид, оливин, серпентин	14–32	219 Верх-Нейвинского массива	5/П и 5/1 Хабарнинского массива
	Металлургический	Хромшпинелид, оливин, серпентин	33–43	Месторождения Кемпирсайского массива (Казахстан), Центральное, Западное (РФ)	Рудопроявления массивов Рай-Из и Войкаро-Сыньинский на полярном Урале, Чирынайского на Чукотке
Экзогенный (россыпной)	Огнеупорный, химический	Хромшпинелид, оливин, серпентин, хлорит	35	Вершина Алапахи (РФ)	Недоизученные месторождения Верблюжьегогорского массива, рудопроявления Алапаевского, Первомайского массивов
	В зависимости от коренного источника	Хромшпинелид	37	Сарановские валунчатые россыпи	Россыпи Войкаро-Сыньинского массива на Полярном Урале

### **3. СВОЙСТВА ХРОМОВЫХ РУД, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ ОБОГАЩЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКУЮ ПЕРЕРАБОТКУ КОНЦЕНТРАТОВ**

В зависимости от качества добываемых хромовых руд их промышленная переработка для использования в металлургической, огнеупорной и химической областях осуществляется путем рудоподготовки (дробления, измельчения, грохочения), иногда сортировки природно-богатых руд и их металлургического передела в кусковом виде, обогащения руд различных сортов методами радиометрического, гравитационного и магнитного обогащения, электростатической сепарации, окускования методами брикетирования или обжига с получением окисленных окатышей мелких богатых руд, в том числе россыпных месторождений и зернистых концентратов обогащения (часто вместе с кусковыми).

#### **3.1. Свойства хромовых руд, влияющие на их обогатимость методами радиометрической сепарации**

Для обогащения хромовых руд в кусковом виде основными предпосылками являются наличие покусковой контрастности по содержанию  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и гранулярный состав исходной руды. Основными методами радиометрического обогащения хромовых руд являются рентгеноабсорбционный, фотометрический и рентгенорадиометрический.

При обогащении хромовых руд рентгенорадиометрическим методом критерием обогащения является содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в кусках руды, так как разделительный признак для хромовых руд формируется в виде параметра спектрального отношения ( $\eta \text{Cr}_2\text{O}_3$ ) количества импульсов характеристического рентгеновского излучения хрома и рассеянного от анализируемой среды излучения.

Основным критерием при обогащении хромовых руд фотометрическим методом сепарации является цвет рудного минерала — хромшпинелида и вмещающих пород. В соответствии с Методическими рекомендациями № 101 «Оценка обогатимости руд черных, легирующих и редких металлов полихромным фотометрическим методом сепарации» [3] для хромовых руд критерием выделения крупнокускового концентрата фотометрической сепарации является цвет хромшпинелидов от темно-серого до черного, для выделения хвостов критерием является цвет вмещающих пород (серпентинитов, диабазов, карбонатов, дунитов от светло-серого до серо-зеленого).

При обогащении хромовых руд рентгеноабсорбционным методом, который базируется на различии ослабления рентгеновского излучения отдельными элементами и соединениями, основным критерием является различие в атомной плотности хромшпинелидов и вмещающих пород. Данный метод имеет ограничения по классу крупности, так как метод не работает для тонковкрапленных руд.

### **3.2. Свойства хромовых руд, определяющие способы их рудоподготовки**

Основными критериями, определяющими способы рудоподготовки хромовых руд, являются:

– физико-механические свойства (крепость пород, дробимость, показатели дробимости с показателями равномерности дробления, истинная и насыпная плотности материала, индекс водопоглощения, индекс дробимости Бонда);

– гранулометрические характеристики исходной руды и продуктов разрушения и разделения по крупности;

– степень раскрытия хромшпинелидов после дробления и измельчения (оценка степени раскрытия хромшпинелида минералогическим анализом на оптическом микроскопе);

– измельчаемость (определяются отечественные (удельная производительность мельницы по готовому классу) и зарубежные (стержневые и шаровые индексы измельчаемости Бонда, абразивность) показатели).

### **3.3. Свойства хромовых руд, влияющие на их обогатимость гравитационными методами**

Физические основы гравитационного обогащения заключаются в отделении хромшпинелидов от вмещающих пород в зависимости от их относительного движения под действием силы тяжести и каких-либо других сил. Параметры, определяющие относительное движение частиц, включают в себя их массу, размеры, объём и плотность минералов и их ассоциаций. Разделение минералов гравитационными методами тем эффективнее, чем больше разница по плотности между рудными и породообразующими минералами.

### **3.4. Свойства хромовых руд, влияющие на их обогатимость магнитными методами**

Основные хромшпинелиды, представляющие наибольший интерес для промышленности, являются парамагнитными, вследствие чего для их обогащения целесообразно применять сухую магнитную сепарацию или полиградиентную магнитную сепарацию.

Получаемые из высокожелезистых руд хромитовые концентраты, как правило, являются некондиционными по соотношению  $Cr_2O_3/FeO$ . Из них можно получить высокоуглеродистый феррохром, содержащий менее 65 % Cr (чардж-хром), стоимость которого ниже, чем стоимость стандартного феррохрома, кроме того он не востребован отечественными производителями стали, для легирования которой он применяется.



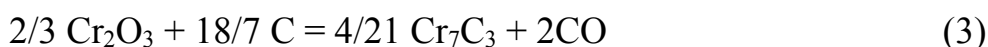
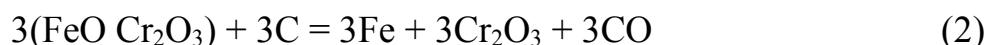
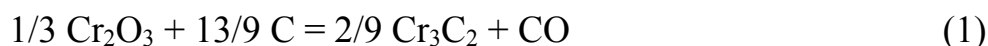
### 3.5. Флотационные свойства хромовых руд

Для обогащения хромовых руд возможно применение флотационной технологии, использование которой наиболее целесообразно только при извлечении хромшпинелида из тонких классов, где гравитационные процессы недостаточно эффективны, т.е. из промпродуктов и хвостов. В зависимости от основы породного комплекса (оливин или серпентин) реализуются различные схемы флотации: жирнокислотными собирателями, катионная флотация и др.

### 3.6. Свойства хромовых руд, влияющие на процесс выплавки углеродистого феррохрома

При выплавке углеродистого феррохрома (далее феррохрома) происходит восстановление углеродом кокса и другими восстановителями железа, хрома и частично кремния из оксидов, содержащихся в хромсодержащем сырье. Восстановление других оксидов весьма незначительно и поэтому не учитывается в расчетах.

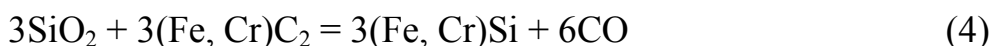
Хром является активным карбидообразующим элементом, поэтому в первую очередь при наиболее низких температурах в печи протекают реакции восстановления железа и образования карбида хрома (1, 2, 3):



В результате взаимодействия оксида хрома с углеродом образуются следующие карбиды:  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , и  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , содержание углерода в которых соответственно равно 13,3; 9,0 и 5,7 %, поэтому, образующийся в реакционной зоне печи феррохром неизбежно содержит около 8–9 % углерода.

Скорость и полнота восстановления хрома зависят от физических свойств хромовой руды: наиболее тугоплавкими и трудновосстановимыми являются высокомагнезиальные руды. Руды с повышенным содержанием оксидов железа и алюминия плавятся и восстанавливаются при более низких температурах.

При высоких температурах происходит частичное восстановление кремния с образованием комплексного силицида железа и хрома (4):



Выплавка углеродистого феррохрома является шлаковым процессом с кратностью шлака 1–1,2 в зависимости от содержания в руде оксида хрома. Нормальный шлаковый режим является необходимым условием технологии выплавки. Феррохром с содержанием хрома 65–70 % и углерода 7–8,5 % имеет температуру плавления 1550–1570 °С, поэтому температура плавления шлака должна быть 1650–1670 °С. Для обеспечения такой температуры плавления и прогрева шлака, обеспечивающих его нормальную

жидкотекучесть и полный выход из печи, состав шлага должен соответствовать составу, приведенному в таблице 2 и области форстерита на тройной диаграмме состояния MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (рисунок 1) [4–6].

Таблица 2

Химический состав конечного шлага выплавки углеродистого феррохрома, %

SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
32–35	37–40	22–27	3–5

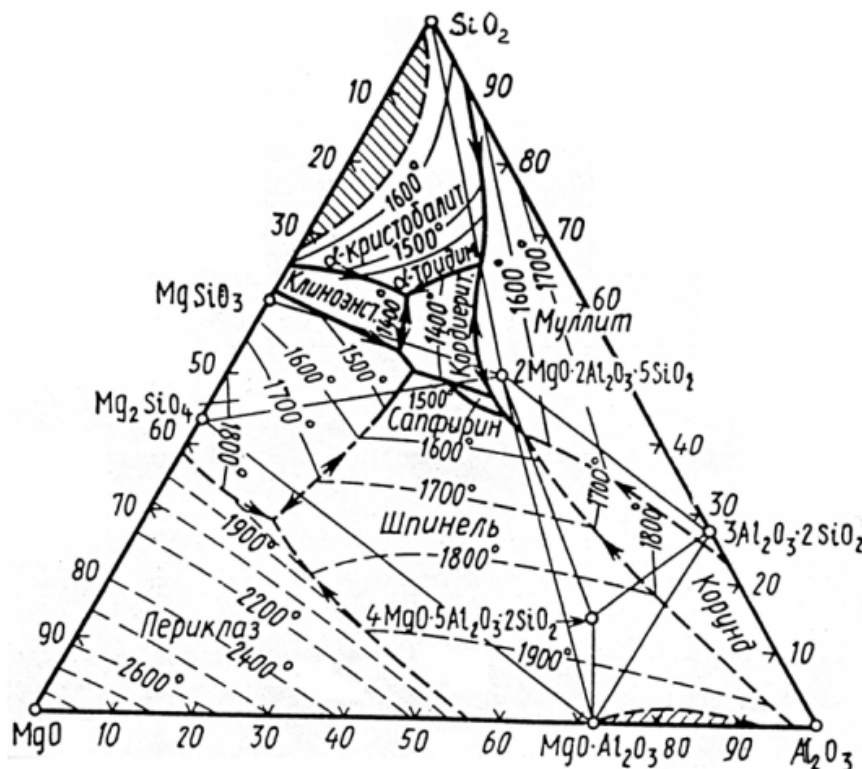
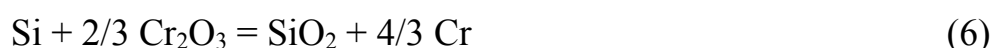
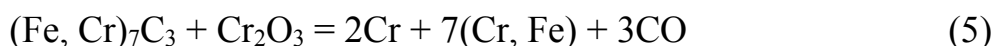


Рисунок 1. Тройная диаграмма состояния MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>

Нормальная жидкотекучесть шлага зависит от соотношения в руде и шлага MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При соотношении 1,0–1,5 образуются «длинные» шлаки, сохраняющие нормальную жидкотекучесть в широком температурном диапазоне и при содержании SiO<sub>2</sub> 32–33 %. При соотношении 2 и более образуются «короткие» шлаки, быстро теряющие подвижность при снижении температуры и требующие повышения содержания SiO<sub>2</sub> до 35 %, а при соотношении более 3 содержание SiO<sub>2</sub> может быть повышено до 37 %.

Содержание углерода в феррохроме определяется интенсивностью процессов рафинирования в так называемом «рудном слое» — кусках полурасплавленной и полупрореагировавшей хромовой руды, располагающихся на границе шлага и металла. Рафинирование можно описать следующими реакциями (5, 6):



#### 4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЖИГ-МАГНИТНОГО СПОСОБА ПЕРЕРАБОТКИ ХРОМИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕЛЕЗИСТОСТИ

Получаемые в результате обогащения высокожелезистых руд концентраты, как правило, имеют низкое соотношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ . При металлургической плавке таких концентратов, как правило, конечным продуктом является чардж-хром (высокоуглеродистый феррохром с содержанием  $\text{Cr} < 65\%$ ) и шлак. Восстановительный обжиг с последующей магнитной сепарацией проводится с целью перевода железа в металлическую фазу и дальнейшего выделения его в магнитную фракцию с целью снижения соотношения  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  и повышения содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в немагнитной фракции.

Процесс твердофазного восстановления хрома и железа из хромшпинелидов в общем виде представлен следующей реакцией (7):



Восстановление железа и хрома из хромшпинелида происходит при температуре 1050–1150 °С. Соотношение между количеством восстановленного железа и хрома определяется температурой процесса.

Кусковая густовкрапленная руда, имеющая меньшую пористость, чем средневкрапленная, восстанавливается медленнее. Различия в характере восстановления руд объясняются различиями в их структуре. В средневкрапленной руде обеспечивается более легкий доступ в глубину куска газообразных носителей углерода к зернам хромита по порам и трещинам во вмещающей породе.

Механизм восстановления хрома и железа из хромовых руд твердым углеродистым восстановителем описывается газо-твердофазной схемой с участием неустойчивых газообразных частиц; восстановителем оксидов являются атомы углерода, которые доставляются к поверхности зерен хромита по трещинам в зернах и порам вмещающей породы газообразными углеродсодержащими молекулами. При восстановлении компонентов хромовых руд или хромитовых концентратов с повышенным содержанием железа, на первых стадиях карботермического процесса в качестве восстановителя может выступать СО.

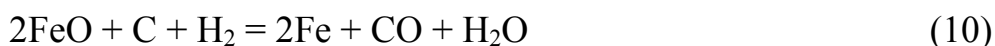
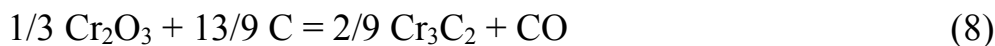
Для проведения экспериментальных исследований по селективному восстановлению компонентов из различных хромовых руд необходимо учитывать следующее:

– температура начала восстановления железа из  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$  составляет 700 °С, следовательно, температура процесса предварительного восстановления железа должна быть выше данного значения;

– температура начала восстановления хрома из руды с образованием карбидов составляет 1130–1160 °С, т.е. температура процесса восстановления хрома должна быть выше указанного значения;

– температура начала восстановления хрома из руды с образованием металлического хрома выше температуры образования карбидов хрома и составляет 1240 °С, следовательно, процесс восстановления хрома из руд всегда протекает с образованием карбидов хрома, что необходимо учитывать при расчете количества восстановителя.

Основные реакции, проходящие в процессе нагрева и восстановления (8, 9, 10):



Учитывая выбранную схему карботермического восстановления хромовых руд, можно отметить, что диффузия катионов и анионов в решетке хромита является лимитирующим звеном по скорости процесса восстановления, поэтому, для снятия кинетических затруднений необходимо стремиться получить меньшую фракцию шихтовых материалов (по массе).

Эффект восстановления оксидов углеродом заметно усиливается в водородной атмосфере.

Схема измельчения восстановленных брикетов и оборудование выбираются с учетом требований по обеспечению максимального разделения железа и хрома в измельченном продукте при наименьшем ошламовании. Магнитная сепарация материала брикетов после восстановительного обжига и измельчения должна выполняться в соответствии с СТО РосГео № 08-008-98 «Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Магнитное обогащение». В качестве оборудования для магнитной сепарации используются сухие магнитные сепараторы на постоянных магнитах для выделения немагнитной фракции, содержащей железо.

## 5. АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ

### 5.1. Оборудование для изучения физико-механических свойств и обогатимости хромовых руд различными методами

Для радиометрического обогащения хромовых руд могут быть использованы рентгенорадиометрические, ретнгеноабсорбционные и фотометрические сепараторы отечественных и зарубежных производителей.

Показатели дробимости определяются в лабораторной щековой дробилке, снабжённой счётчиком активной энергии. Для дробления в лабораторных условиях используются щековые и валковые дробилки. Индекс дробимости Бонда определяется с помощью двойного маятникового копера с массой соударяющихся молотов по 13,6 кг каждый. Для анализа гранулометрических характеристик хромовых руд могут быть использованы ситовые и лазерные анализаторы. Показатели измельчаемости определяются

в стержневых, шаровых и центробежно-ударных мельницах различных типоразмеров по отечественным и зарубежным методикам.

Гравитационный анализ по плотности проводят в стаканах, чашках или в специальных воронках с использованием тяжелых жидкостей. В качестве основного оборудования для гравитационного обогащения хромовых руд рекомендуется применять отсадочные машины, короткоконусные гидроциклоны, винтовые сепараторы и шлюзы, концентрационные столы. Для обогащения тонких классов применяются центробежные концентраторы.

Магнитный анализ и обогащение хромовых руд в лабораторных условиях проводят с использованием магнитных сепараторов. Выбор сепаратора для проведения магнитного анализа производят в зависимости от способа, массы пробы и крупности исходного материала. Для определения обогатимости хромовых руд магнитным способом применяются сухие магнитные сепараторы различной напряженности, мокрый магнитный анализатор — «Трубка Девиса», высокоградиентные мокрые магнитные сепараторы, например, «Гумбольт», ЭРЛ, «Слон» или др.

Для флотационного обогащения хромовых руд используются механические, пневмомеханические, колонные флотомашин, пилотные флотационные установки.

## **5.2. Оборудование для высокотемпературного обжига и магнитной сепарации**

Для подготовки концентратов к обжигу изготавливается партия брикетов, в состав которых входит рудный материал в смеси с восстановителем (углем) и связующим (лигносульфонатом техническим).

Перед высокотемпературным обжигом рекомендуется проводить термогравиметрическое исследование на термоанализаторе, например, термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter и ИК Фурье-спектрометре.

Высокотемпературный обжиг (1000–1400 °С), а также выплавка феррохрома проводится в печи Таммана (рисунок 2). В качестве газавосстановителя могут использоваться водород, монооксид углерода или смесь этих газов. В рабочем пространстве печи расположен реактор, герметично соединённый с системой подачи газа. Эта система состоит из двух ветвей и обеспечивает раздельное поступление нейтрального и восстановительного газов. Количество газов контролируется ротаметрами, расход поддерживается с помощью моноставов. Блок регистрации кинетики изменения массы образца включает: электронные весы, автоматический цифровой преобразователь и компьютер. Блок регулирования температуры в реакционном пространстве обеспечивает поддержание заданного температурного режима печи во время опыта. Он включает: высокоточный регулятор температуры ВРТ-3, потенциометр ПП-63 и термопару П-ПР5/20. Система позволяет производить, регулировать и поддерживать температуру в широком диапазоне от 0 до 1200 °С.

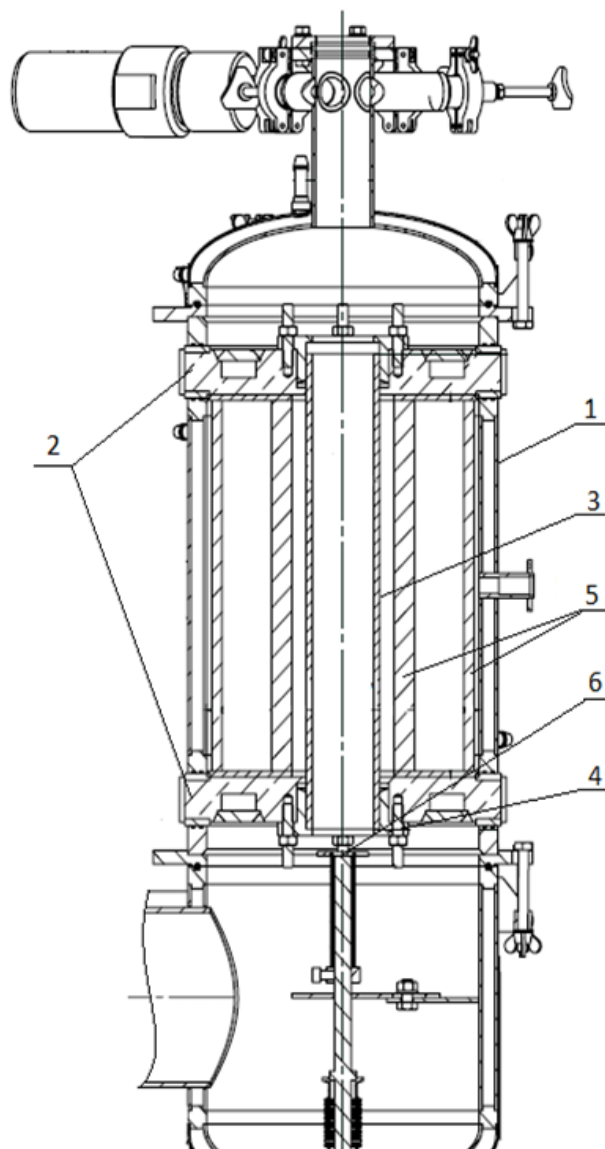


Рисунок 2. Печь «Гаммана»: 1 — камера печи; 2 — водоохлаждаемые диски; 3 — графитовый нагреватель; 4 — прижимные крышки; 5 — коаксиальные графитовые цилиндры-экраны; 6 — загрузочный столик

Камера печи (1) представляет собой вертикальный водоохлаждаемый цилиндр, с торцов которого располагаются медные водоохлаждаемые диски (2), через которые подводится ток от понижающего трансформатора к цилиндрическому графитовому нагревателю (3). Контакт между нагревателем и медными дисками создается с помощью уплотнения из графитовой крошки, запрессованной прижимными крышками (4). Теплоизоляция камеры состоит из коаксиальных графитовых цилиндров-экранов (5). Тигель с загрузкой устанавливается на загрузочный столик (6).

В промышленности процесс восстановления хромитового концентрата без предварительного брикетирования можно проводить водородом в непрерывно действующих вращающихся наклонных трубчатых печах. Конструкция одной из таких печей изображена на схеме (рисунок 3).

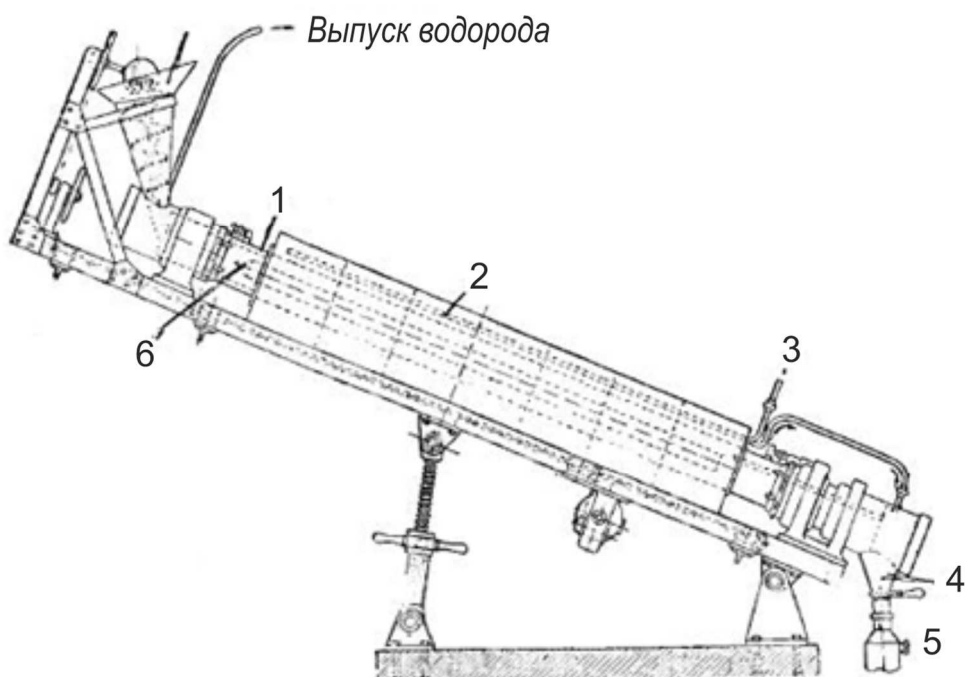


Рисунок 3. Схема конструкции наклонной вращающейся трубчатой электропечи для восстановления водородом: 1 — загрузочный бункер со шнековым питателем; 2 — вращающаяся труба; 3 — центральная труба для создания кольцевого реакционного пространства; 4 — трубка для подачи водорода; 5 — труба для предварительного подогрева водорода; 6 — герметичный приемный бункер

Температура восстановления 1000–1300 °С, расход водорода в 2–2,5 раза больше теоретически необходимой. Скорость вращения 2–3 оборота в минуту.

Типы лабораторного оборудования при проведении исследований должны масштабироваться на промышленные условия [6].

Дробление и измельчение восстановленного материала в лабораторных условиях выполняется на лабораторных дробилках. Материал направляется на ситовой анализ вручную, либо с применением ситового анализатора. В промышленных условиях для измельчения окатышей могут быть использованы мельницы сухого самоизмельчения. Исследования по обогатимости методом магнитной сепарации выполняются на барабанных сепараторах с постоянными магнитами с различными напряженностями магнитного поля на поверхности барабана.

## 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В общем виде схема исследований представлена на рисунке 4. Последовательность операций в каждом частном случае зависит от свойств руды.

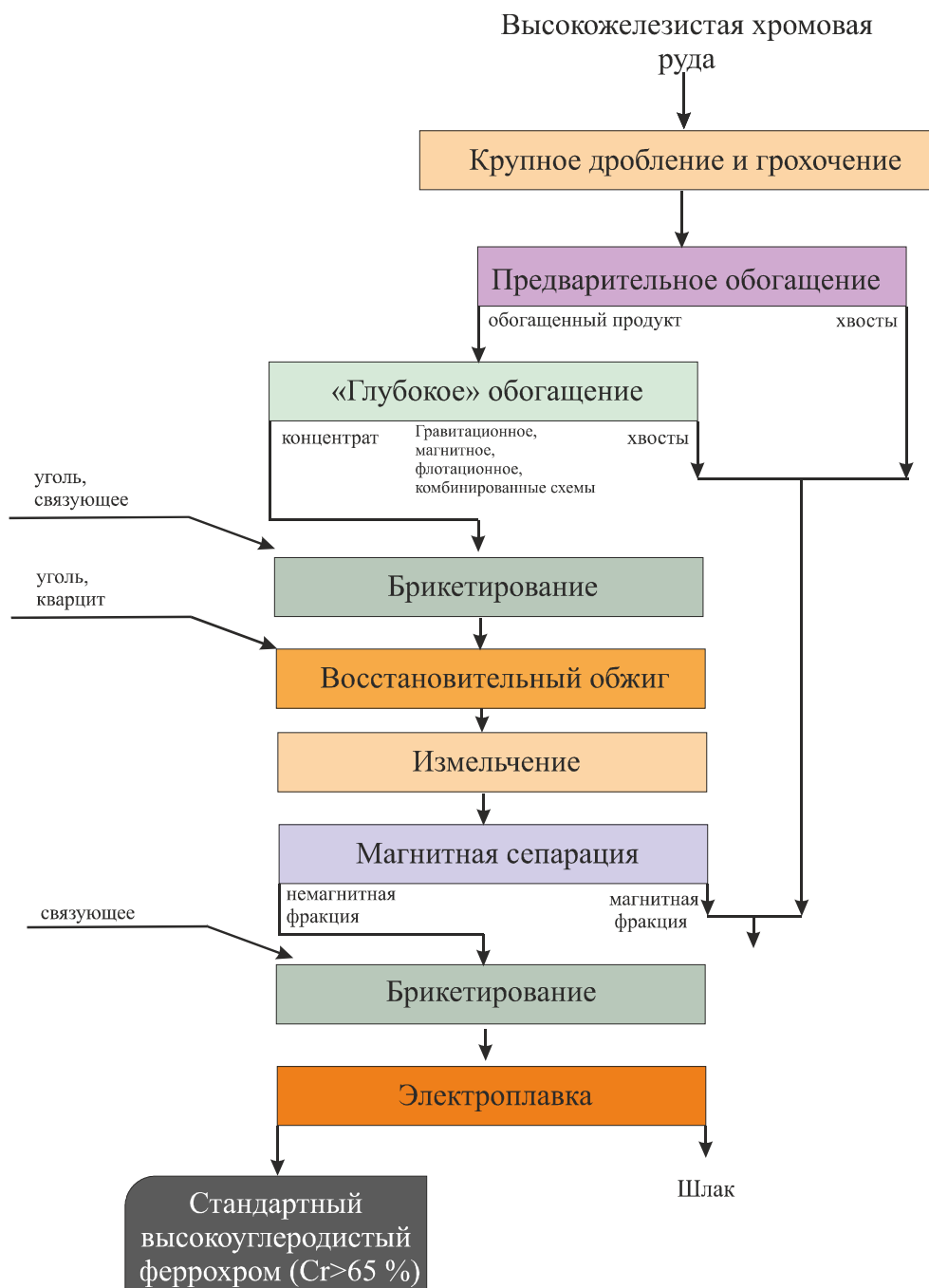


Рисунок 4. Блок-схема переработки высокожелезистых хромовых руд с получением стандартного высокоуглеродистого феррохрома

### 6.1. Подготовка проб к исследованиям

Объектами исследований по обогащению являются технологические пробы (исходная руда, концентраты обогащения) высокожелезистых и высокоглиноземистых хромовых руд с низким соотношением  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ . Представительность отбора проб определяется требованиями Методических рекомендаций № 102 «Отбор технологических проб при геологоразведочных работах на рудные полезные ископаемые» [7]. Обязательным условием проведения технологических испытаний данной пробы является наличие акта отбора и паспорта пробы.



Масса технологической пробы должна быть достаточной для проведения исследований в полном объеме:

- для лабораторных технологических проб — 0,1–5 т;
- для укрупненно–лабораторных — 10–100 т.

Технологические лабораторные пробы предназначены для изучения вещественного состава, физических и технологических свойств руды или концентрата обогащения.

Укрупненно-лабораторные пробы предназначены для разработки и испытания технологической схемы пирометаллургической переработки.

Крупность материала должна быть не более 3–20 мм. В случае превышения крупности 20 мм необходимо производить дробление, а в случае крупности менее 3 мм окускование (брикетирование, получение окатышей) [3].

## **6.2. Порядок выполнения исследований для получения концентратов**

Исследования по крупнокусковому обогащению проводятся в соответствии с СТО РосГео № 08-009-98 «Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Радиометрические методы обогащения» [8] и Методическими рекомендациями № 103 «Оценка обогатимости руд черных и легирующих металлов методами крупнокусовой сепарации» [9] и включают:

- определение гранулярного состава технологической пробы;
- отбор представительных выборок для изучения технологических свойств руды;
- изучение неравномерности (контрастности) руды по содержанию основных компонентов;
- определение метода сепарации и выбор признака разделения;
- определение границ разделения в процессе радиометрической сепарации;
- проведение эксперимента по сепарации.

Методы исследований свойств хромовых руд, влияющих на способ рудоподготовки при обогащении, разделяются на следующие:

- изучение физико-механических свойств исходной руды с целью выбора способов дробления (определения крепости пород; дробимости в щековой (конусной) дробилке; показателя дробимости и показателя равномерности дробления; замеры истинной и насыпной плотности материала, измерения индекса водопоглощения, определения индекса дробимости Бонда);
- определение гранулометрических характеристик исходной руды и продуктов разрушения и разделения по крупности с целью выбора способов и аппаратов для грохочения и классификации и определения степени ошламования конечных продуктов (ситовой анализ на ситах с крупностью ячеек 70; 60; 50; 40; 30; 25; 22,5; 20; 17,5; 15; 12,5; 10; 7,5; 5; 3; 2; 1,25; 1; 0,63; 0,315; 0,200; 0,160; 0,100; 0,063; 0,050 мм);

– оптико-минералогический анализ с целью определения степени раскрытия хромшпинелидов после дробления и измельчения (минералогический анализ степени раскрытия хромшпинелида на оптическом микроскопе);

– определение измельчаемости по российским (и зарубежным) методикам (методика Бонда, методика определения удельной производительности).

Схема рудоподготовки и оборудование для нее выбираются с учетом требований по обеспечению максимального раскрытия полезного минерала при наименьшем ошламовании (выходе класса крупности  $-0,050$  мм). Для классификации хромовых руд перед обогащением, помимо грохотов, используются гидроклассификаторы частично (могут быть использованы в качестве оборудования для предконцентрации) и гидроциклоны.

Гравитационное и магнитное обогащение хромовых руд должно проводиться в соответствии с СТО РосГео № 08-007-98 «Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Гравитационные методы обогащения» [10] и СТО РосГео № 08-008-98 «Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Магнитное обогащение» [11].

Испытания на обогатимость гравитационными и магнитными методами должны включать следующие основные этапы:

- изучение гранулярного состава исходной руды;
- гравитационный и магнитный анализы гранулометрических классов крупности руды;
- изучение минерального состава руды;
- составление базовой схемы на основании полученной информации о руде и ее испытание;
- проработка отдельных вариантов схемы, в том числе испытания различных типов гравитационных и магнитных обогатительных аппаратов в отдельных операциях;
- составление принципиальной базовой схемы обогащения и проведение контрольного опыта для ее проверки и уточнения;
- расчет технологических показателей (с учетом распределения промпродуктов) и составление рекомендуемой схемы обогащения;
- обогащение всей массы пробы по рекомендуемой схеме.

Исследования по флотационному обогащению выполняются в соответствии с СТО РосГео № 08-006-98 «Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Флотационный метод обогащения» [12]. Испытания на обогатимость флотационным методом должны включать следующие этапы:

- изучение гранулярного состава;
- изучение минерального состава;
- изучение свойств руды, влияющих на обогатимость флотационным методом обогащения;
- изучение реагентного режима флотации хромовой руды;

- изучение кинетики (скорости) флотационного процесса;
- изучение возможности снижения негативного влияния шламов на процесс;
- проведение экспериментов в установленных условиях флотационного процесса в открытом цикле;
- разработка технологической схемы флотации в открытом цикле;
- флотационные испытания в замкнутом цикле.

### **6.3. Порядок выполнения исследований по обжиг-магнитной переработке концентратов**

Для подготовки проб изготавливаются партии брикетов: хромовый концентрат и смесь концентрата с промпродуктом отдельно смешиваются с восстановителем (7–9 %) и связующим (3–5 %), смачиваются водой до влажности 7–9 % и окусковываются.

Условия брикетирования:

- давление при брикетировании 250 кг/см<sup>2</sup>;
- размер брикетов (длина x ширина x высота): 30x25x12 мм.

Сушка брикетов до постоянной массы проводится при температуре 200 °С. Прочность брикетов и окатышей оценивается по следующим параметрам:

- число сбрасываний сырых и обожжённых брикетов с высоты 1 м на стальную плиту без разрушений;
- разрушающее усилие, определяемое на универсальной испытательной разрывной машине;
- термостойкость при быстром нагреве до 1200 °С.

Для высокотемпературного обжига (от 1050 до 1400 °С) используется печь Таммана. Для каждой последующей партии брикетов температура обжига должна повышаться не более чем на 100 °С, при этом первая партия обжигается при температуре не ниже 950 °С.

Проба предварительно просушивается и помещается в корзинку, масса пробы непрерывно контролируется в ходе опыта. Проба нагревается до 800 °С в токе азота до полного удаления гидратной влаги и не прореагировавших карбонатов, затем восстанавливается при температуре 800–900 °С углеродом брикетов в атмосфере восстановительного газа (водорода). В процессе восстановления постоянно контролируется потеря массы навески. По окончании опыта установка вновь продувается азотом во избежание образования взрывоопасных смесей и в целях быстрого охлаждения восстановленного материала и предотвращения вторичного окисления.

Восстановленный материал подвергается измельчению до крупности –2+0 мм, затем выполняется ситовый анализ части материала на ситах с крупностью ячеек 2; 1,25; 1; 0,63; 0,315; 0,200; 0,160; 0,100; 0,063; 0,050 мм, после чего проводится магнитный анализ каждого класса крупности на сепараторе с постоянными магнитами для того, чтобы установить оптимальную степень раскрытия материала. Оставшаяся масса материала

доизмельчается до оптимальной крупности и направляется на сепарацию. Сепарация выполняется в соответствии с СТО РосГео № 08-008-98 «Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Магнитное обогащение» [10]. После охлаждения материал извлекается из печи и подвергается визуальному осмотру, часть его истирается для подготовки проб на химический анализ, другая часть направляется на установку для определения прочности.

После проведения магнитной сепарации от магнитной и немагнитной фракций отбираются партии проб, выполняется их анализ на содержания Cr и Fe для магнитной фракции и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO для немагнитной фракции. По данным анализа заполняется таблица показателей восстановительного обжига концентрата (таблица 3).

Таблица 3

Образец таблицы показателей восстановительного обжига концентрата

Режим опыта		Масса магнитной фракции, г	Состав магнитной фракции, %			Извлечение в магнитную фракцию, %		Масса немагнитной фракции, г	Состав немагнитной фракции, %					
T, °C	t, мин		Cr	Fe	C	Cr	Fe		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Ост.	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
950														
1050														
1150														
...														

По данным анализов выбираются партии материала — магнитная и немагнитная фракции, анализ химического состава магнитной фракции которых показывает, что соотношение Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO ≥ 3 в немагнитной фракции выше 3, а потери Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в магнитной фракции не более 5 %.

Степень восстановления окатышей определяется по формуле:

$$R = O_2 \text{ Fe} / O_{2\text{общ}} \times 100\%,$$

где: O<sub>2</sub> Fe — количество кислорода, отнятого от оксида;

O<sub>2общ</sub> — общее количество кислорода, связанное с железом в брикетах.

Степень металлизации брикетов определяется отношением железа металлического к железу общему.

Показатели магнитной сепарации брикетов заполняются в виде таблицы для каждой из партий с соотношением Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO ≥ 3 (таблица 4).

Таблица 4

Показатели магнитной сепарации брикетов

Фракции, выделенные при напряженности магнитного поля H, мТл	Содержание, %		Извлечение от операции, %	
	FeO/Fe	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cr	Fe <sub>общ</sub>	Cr
Магнитная фракция	/	/		
Немагнитная фракция	/	/		

По данным таблиц 3, 4 температура обжига выбирается таким образом, чтобы степень перехода хрома в магнитную фракцию составляла не более 5 %, при извлечении Fe в магнитную фракцию более 55 %.

Немагнитная фракция направляется на исследования по получению углеродистого феррохрома, соответствующего требованиям ГОСТ 4757-91, магнитная фракция может быть направлена на выплавку чугуна, соответствующего требованиям ГОСТ 4832-95 [13].

#### **6.4. Порядок выполнения исследований по пирометаллургической переработке немагнитной фракции после обжига**

Перед плавкой рассчитывается состав шихты. Пример расчета представлен в Приложении 1.

В холодную печь Таммана опускается графитовый тигель с шихтой внутренним диаметром 55 мм и высотой 150 мм. Рабочая зона печи в нижней части герметизируется и имеет ввод для термопары. Тигель ставится на столик, расположенный в самой горячей зоне печи. Температура в печи контролируется вольфрам-рениевой термопарой марки ВР5/20, горячий спай которой размещается непосредственно под дном тигля. Выплавку углеродистого феррохрома ведут при температурах 1650–1750 °С, что обеспечивает достаточную жидкоподвижность шлака и сплава и хорошее их разделение.

Выбор состава образующегося в печи шлака является важнейшим вопросом технологии производства углеродистого феррохрома. Состав и температура плавления шлака почти полностью зависят от состава пустой породы в концентрате, и его корректировку проводят с помощью вводимого в шихту флюса, доводя состав шлака до оптимального. Процесс получения углеродистого феррохрома протекает по реакциям (2, 3). После появления жидкой фазы выдержка составляет 30 минут. После полного охлаждения тигель разбивается, шлак отделяется от металла. Пробы направляются на химический анализ. После получения результатов химического анализа данные записываются в виде таблиц (таблицы 5, 6).

Таблица 5

Химический состав феррохрома

Содержание, %					
Cr	Fe	C	Si	P	S

Таблица 6

Химический состав шлака

Содержание, %					
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO

## 6.5. Анализ полученных результатов

Критерием эффективности [14] обогащения хромовой руды по комбинированной схеме с применением обжиг-магнитного процесса являются технологические критерии такие как:

- качество концентрата;
- содержание хрома в хвостах;
- извлечение хрома в концентрат;
- потери хрома с хвостами;
- выход обогащенного продукта;
- степень сокращения;
- степень обогащения;
- степень обогащения с учетом теоретически возможного;
- получение немагнитной фракции, в которой соотношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO} \geq 3$ .

Получение стандартного высокоуглеродистого феррохрома с содержанием  $\text{Cr} > 65\%$  возможно лишь из немагнитной фракции, в которой соотношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  выше 3. Для подтверждения возможности получения стандартного феррохрома необходимо провести плавку, критерием эффективности которой является степень извлечения ценных компонентов и вредных примесей в шихту и в металл. Результаты плавки оценивают на основании технологического баланса. Для этого определяют извлечение ценных и вредных компонентов в металл и шлак, а также выход металла.

Извлечение хрома в металл рассчитывается по формуле:

$$E = (P \times C) / (P_0 \times C_0),$$

где:  $C_0$  — содержание хрома в исходной навеске, %;

$C$  — содержание хрома в металле, %;

$P_0$  — масса исходной навески, г;

$P$  — масса металла, г.

## 6.6. Оформление результатов

Отчет должен содержать результаты исследований по обогащению хромовых руд, обжиг-магнитной и пирометаллургической переработке концентратов. При необходимости должен быть выполнен технико-экономический расчет целесообразности применения вышеперечисленных методов. Примеры оформления результатов исследований приведены в Приложении 2.

## 7. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

В процессе отбора и подготовки технологических проб участвует персонал, прошедший обучение и инструктаж по ведению горных работ на предприятии. Допуск случайных лиц категорически запрещается.

Аппаратура и оборудование, применяемое при изучении обогатимости руд радиометрическими методами, относятся к классу электромеханических

устройств, включающих радионуклидные источники или рентгеновские трубки.

При эксплуатации радиометрических установок вне зависимости от реализуемого метода должны выполняться: «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правила устройства электроустановок», утвержденные Госэнергонадзором.

При использовании в установках источников ионизирующего излучения должны соблюдаться требования, установленные нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009 и Основными санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений.

К работе на магнитных сепараторах допускаются лица, ознакомленные с их устройством и прошедшие инструктаж. Перед включением установки проверяют наличие заземления, отсутствие оголенных проводов. При эксплуатации запрещается производить регулировку зазора при включенной магнитной системе. Не разрешается устанавливать и приближать ближе 0,5 м к сепаратору измерительные приборы и часы. При работе исключить возможность попадания воды на катушки сепаратора и источники питания.

В целях безопасной эксплуатации лабораторных электропечей (печей) они должны быть установлены в специальном помещении со свободной циркуляцией воздуха, отоплением, водопроводом и канализацией. Электропечь должна быть оборудована технологической вытяжной вентиляцией. С целью защиты персонала и окружающей среды от пыли и шума предусматривается заключение в пыле- шумоизолирующий кожух электропечей.

Помещение печной должно быть обеспечено первичными средствами пожаротушения в соответствии с действующими «Правилами пожарной безопасности при эксплуатации предприятий металлургической промышленности» и, как правило, оборудовано средствами автоматической пожарной сигнализации (датчиками, извещателями). Помещение должно быть обеспечено искусственным, естественным и совместным освещением. Кроме рабочего, должно быть предусмотрено аварийное освещение от независимого источника, подающего питание на 10 % всех светильников.

В помещении запрещается загромождать проходы, а также хранить какие-либо материалы, предметы и проводить работы, не связанные с эксплуатацией или ремонтом электропечей.

К обслуживанию печей могут быть допущены лица, достигшие 18 лет, прошедшие специальный инструктаж по эксплуатации и обслуживанию электропечей.

Установка печи должна обеспечить возможность осмотра, ремонта, очистки как с внутренней стороны, так и с наружной.

В процессе использования печи должна соблюдаться строгая технологическая последовательность, а также использоваться специальные

одежда и средства защиты: щипцы, суконные брюки и куртка, хлопчатобумажное белье и специальная обувь, вачеги, тонированные очки.

Персонал, обслуживающий электропечь, должен вести рабочий журнал, в котором записываются дата, время, условия опыта.

Разделка проб, квартование и истирание проводятся в боксах с вытяжными устройствами.

## **8. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОЖЕЛЕЗИСТЫХ ХРОМОВЫХ РУД**

### **8.1. Методика расчета основных показателей эффективности**

Технико-экономическая оценка производится с использованием следующих методических указаний и рекомендаций:

1. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев). Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р.

2. Методические рекомендации по расчету экономической эффективности инвестиционных проектов. Утверждено Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике 21.06.1999 N BK477.

3. Методические рекомендации № 66. Экономическая оценка технологических схем обогащения комплексных руд. Москва, НСОМТИ, 1990.

4. Классификация основных средств, включаемых в амортизационные группы. Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 № 1 (ред. от 28.04.2018).

В расчетах используются такие понятия, как:

- ставка (норма) дисконтирования;
- ДП — денежный поток или Cash Flow (CF);
- ЧДД — чистый дисконтированный доход или чистая современная стоимость, Net Present Value (NPV);
- ИД — индекс доходности или Profitability Index (PI);
- ВНД — внутренняя норма доходности или внутренняя норма прибыли, Internal Rate of Return (IRR).

Денежный поток — это движение наличных средств, будущих денежных поступлений (приток) и расходов (отток) при строительстве и эксплуатации предприятия, иллюстрирующее финансовые результаты от возможной реализации проекта.

При расчете денежного потока приведение разновременных затрат и доходов к начальному периоду оценки осуществляется с использованием процедуры дисконтирования.

Коэффициент дисконтирования ( $q_t$ ) определяется по формуле:



$$q_t = \frac{1}{(1+E)^t},$$

где:  $E$  — ставка дисконтирования, доли ед.;

$t$  — номер расчетного года.

В соответствии с п. 45 «Методических рекомендаций по технико-экономическому обоснованию кондиций...» при отсутствии документального обоснования ставки дисконтирования обычно принимаются равными 10 и 15 %.

Чистый дисконтированный доход для постоянной нормы дисконтирования вычисляется как сумма приведенных к начальному этапу оценки всех доходов за весь расчетный период. Величина ЧДД рассчитывается по формуле:

$$\text{ЧДД (NPV)} = \sum_{t=0}^T (\text{Ц}_t - \text{З}_n + \text{А}_t) \frac{1}{(1+E)^t} - \sum_{t=0}^T \left( \text{К}_t \frac{1}{(1+E)^t} \right),$$

где:  $\text{Ц}_t$  — стоимость реализованной продукции (выручка предприятия) в  $t$ -м году;

$\text{З}_n = \text{З}_t + \text{Н}_\phi + \text{Н}_n$  — полные затраты, производимые в  $t$ -м году;

$\text{А}_t$  — амортизационные отчисления, производимые в  $t$ -м году;

$T$  — расчетный период (в общем случае от начала строительства до ликвидации предприятия);

$\text{К}_t$  — капитальные вложения в  $t$ -м году;

$\text{Н}_n$  — налог на прибыль;

$\text{Н}_\phi$  — налоги, погашаемые из валовой прибыли (налог на имущество).

Если величина чистого дисконтированного дохода положительная, проект признается экономически эффективным.

Индекс доходности представляет собой отношение суммы приведенных доходов ( $\text{Ц}_t - \text{З}_n + \text{А}_t$ ) к величине приведенных капиталовложений:

$$\text{ИД} = \frac{\sum_{t=0}^T (\text{Ц}_t - \text{З}_n + \text{А}_t) \frac{1}{(1+E)^t}}{\sum_{t=0}^T \text{К}_t \frac{1}{(1+E)^t}}$$

В экономически эффективных проектах величина ИД больше единицы.

Внутренняя норма доходности (ВНД) представляет собой ту норму дисконтирования, при которой величина приведенных доходов равна приведенным капиталовложениям. В случае, если ВНД больше величины нормы дисконтирования, инвестиционный проект имеет запас прочности при его реализации.

Срок окупаемости капиталовложений — минимальный период времени от начала реализации проекта, за пределами которого величина накопленного (кумулятивного) денежного потока становится неотрицательной. При оценке проекта используются два срока окупаемости — с использованием процедуры дисконтирования и без нее.

## 8.2. Описание методологии расчета инвестиционных и эксплуатационных затрат

### *Расчет капитальных затрат.*

Базой для расчета первоначальных капитальных и эксплуатационных затрат является исходная информация, полученная в результате технологических исследований проб по оцениваемому объекту. Такой информацией является:

- технологическая схема переработки руд с описанием технологических процессов;
- наименование выпускаемых товарных продуктов с указанием ГОСТа, ОСТа, ТУ;
- технологические показатели: выход концентратов и продуктов, технологическое извлечение по переделам и сквозное, содержание полезных и вредных компонентов в товарных продуктах;
- возможная годовая мощность по руде;
- режим работы рудо-перерабатывающего комплекса;
- перечень технологического оборудования, необходимого для организации производства с указанием технических характеристик на указанную производственную мощность;
- нормы обслуживания технологического оборудования и явочное количество работников, задействованных в производственном процессе с указанием квалификации и типа выполняемых работ для выполнения годовой производственной мощности;
- расход основных материалов и реагентов с разбивкой по переделам;
- расход энергетических ресурсов с разбивкой по переделам (электроэнергии, технологической воды, тепла, газа, пара и пр.).

Исходя из конъюнктуры рынка товарных продуктов, а также данных по запасам руды и содержанию полезных компонентов в товарных продуктах уточняется годовая производственная мощность.

Расчетный период принимается 20 лет или на срок обеспеченности запасами при их отработке за меньший срок.

Прямым счетом рассчитываются объемы инвестиций в основное производственное оборудование. Статьи инвестиционных затрат, которые на текущем этапе укрупненной оценки не могут быть определены прямым счетом, рассчитываются по укрупненным показателям на основании объектов-аналогов с учетом намечаемой производительности по добыче и переработке с применением поправочных коэффициентов-дефляторов на дату проведения оценки и в пересчете на изменение производственной мощности оцениваемого объекта в сравнении с выбранным объектом-аналогом.

### *Расчет эксплуатационных затрат*

Амортизация рассчитывается линейным способом на основе норм амортизационных отчислений, установленных в РФ.

Расчет основных затрат на материалы и реагенты, затрат на топливо, электроэнергию и воду, налоговые отчисления осуществляется прямым счетом. На основании объектов-аналогов производится укрупненная оценка ряда прочих статей затрат: стоимость руды (включает добычу руды, ГКР, вскрышу), транспортно-заготовительные работы, общепроизводственные, общехозяйственные и коммерческие расходы.

Расчет фонда оплаты труда персонала выполняется на основе данных Росстата о среднемесячной заработной плате по субъектам Российской Федерации и о среднемесячной заработной плате по видам экономической деятельности за период 12 месяцев на дату оценки.

*Налоговые отчисления и плата за выбросы загрязняющих веществ:*

– налоговые отчисления по налогу на прибыль рассчитываются в соответствии с Главой 25 части 2 НК РФ;

– ставки страховых взносов рассчитываются в соответствии с Главой 34 НК РФ;

– страховые тарифы на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний принимаются согласно закона от 22.12.2005 № 179-ФЗ;

– расчет налога на имущество производится в соответствии с Главой 30 НК РФ (в ред. 202-ФЗ от 29.11.2012);

– размер отчислений по налогу на добычу полезных ископаемых определяется согласно Статье 342 НК РФ;

– плата за выбросы загрязняющих веществ и размещение отходов производства оценивается в размере 0,5–1 % от затрат на добычу и переработку руды;

– прочие налоги и платежи оцениваются в размере 1–2 % от стоимости товарной продукции.

На основании выполненных расчетов производится оценка экономической эффективности оцениваемого объекта (Приложение 3).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по применению Классификации запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Хромовые руды. Министерство природных ресурсов Российской Федерации. 2018.
2. ГОСТ 4757-91 Феррохром. Технические требования и условия поставки.
3. Оценка обогатимости руд черных, легирующих и редких металлов полихромным фотометрическим методом сепарации. Методические рекомендации НСОМТИ № 101. М.: ВИМС, 2014. 29 с.
4. Рысс М.А. Производство ферросплавов. М.: Metallurgia, 1985. 344 с.
5. Воскобойников В.Г. Общая металлургия. М.: Академкнига, 2005. 768 с.
6. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Металлургия хрома. М.: ЭЛИЗ, 1999. 582 с.
7. Отбор технологических проб при геологоразведочных работах на рудные полезные ископаемые. Методические рекомендации НСОМТИ № 102. М.: ВИМС, 2014. 29 с.
8. СТО РосГео № 08-009-98 Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Радиометрические методы обогащения.
9. Оценка обогатимости руд черных и легирующих металлов методами крупнокусковой сепарации. Методические рекомендации НСОМТИ № 103. М.: ВИМС, 2014. 34 с.
10. СТО РосГео № 08-007-98 Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Гравитационные методы обогащения.
11. СТО РосГео № 08-008-98 Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Магнитное обогащение.
12. Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Флотационный метод обогащения.
13. ГОСТ 4832-95 Чугун литейный. Технические условия.
14. Барский Л.А., Плаксин И.Н. Критерии оптимизации разделительных процессов. М.: Наука, 1967. 119 с.

Пример расчета состава шихты

В таблице 1 представлены химические составы шихтовых материалов.

Таблица 1

Химические составы шихтовых материалов

Шихта	Содержание, масса, %							Сумма оксидов элементов
	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
Смесь хромитового концентрата и промпродукта (1:1)	14,59	15,88	8,46	1,80	35,70	18,26	0,03	5,28
Уголь марки «Д»	Углерод=57		Летучие=34		Зола=9		Влага=15	–
Зола угля	1,65	27,35	54,54	3,03	8,88		–	4,55
Кварцит	0,93	1,16	97,6	–	–	–	–	0,31

Принимаем извлечение хрома в металл равным 90 % ( $\mu_{Cr}$ ), железа 95 % ( $\mu_{Fe}$ ). Расчет шихты производится на 1 т концентрата. Масса хрома, перешедшего в металл, определяется по следующей формуле:

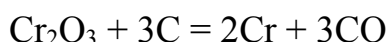
$$m_{Cr} = m_k \times C_{Cr_2O_3} \times \mu_{Cr} \times 2 \times M_{Cr} / M_{Cr_2O_3} = 219,84 \text{ кг}$$

Масса железа, перешедшего в металл, определяется по следующей формуле:

$$m_{Fe} = m_k \times C_{FeO} \times \mu_{Fe} \times M_{Fe} / M_{FeO} = 134,92 \text{ кг},$$

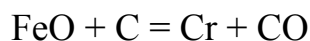
где:  $m_x$ ,  $C_x$ ,  $M_x$  — масса, концентрация и молекулярная масса x-вещества.

Требуется углерода для восстановления хрома по реакции:



$$m_{C1} = (m_{Cr} \times 3 \times M_C) / (2 \times M_{Cr}) = 76,1 \text{ кг}$$

Требуется углерода для восстановления железа по реакции:



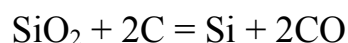
$$m_{C2} = (m_{Fe} \times M_C) / M_{Fe} = 28,9 \text{ кг}$$

Если временно пренебречь количеством железа, восстанавливаемого из золы восстановителя и флюса, то сумма хрома и железа в сплаве составит 354,76 кг, что при 7,5 % углерода и 1% кремния составит 91,5 %.

Полная масса металла будет составлять: 387,72 кг.

В нём кремния 3,88 %.

На восстановление кремния требуется углерода по реакции:



$$m_{C3} = C_{Si} \times M_C / M_{Si} = 3,32 \text{ кг}$$

Расчет необходимого количество оксида кремния рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{SiO}_2} = C_{\text{Si}} \times M_{\text{SiO}_2} / M_{\text{Si}} = 8,3 \text{ кг}$$

На науглероживание металла потребуется:

$$m_{\text{C}_4} = m_{\text{Me}} \times C_{[\text{C}]} = 29,0 \text{ кг}$$

На восстановление оксидов и науглероживание всего потребуется:

$$m_{\text{C}_{\text{общ}}} = m_{\text{C}_1} + m_{\text{C}_2} + m_{\text{C}_3} + m_{\text{C}_4} = 137,32 \text{ кг C}$$

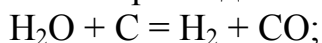
Масса угля вычисляется по формуле:

$$m_{\text{угля}} = m_{\text{C}_{\text{общ}}} / C_{\text{Сугля}} = 240,9 \text{ кг сухого угля}$$

При влажности угля 15 % теоретически сухого количества угля будет: 283,4 кг влажного угля.

Необходимо отметить, что часть восстановителя расходуется неэффективно:

- сгорание на колошнике за счёт кислорода воздуха;
- расход на восстановление водорода из воды по реакции:



- восстановление железа из восстановителя.

Количество необходимого на это углерода невелико и компенсируется за счет участия углерода в реакции, который вносится электродами и участием в восстановлении летучих. Получаемая расчётная цифра 240,9 кг сухого угля весьма близко подходит к наблюдаемому на практике расходу (цех № 2 ЧЭМКа).

Основными составляющими шлака являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$ , их соотношение будет характеризовать консистенцию шлака. Из предварительных экспериментов найдено, что количество  $\text{SiO}_2$  должно составлять 40 %, а суммарная концентрация  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  60 % от суммы всех компонентов. Расчётом показано, что содержание  $\text{SiO}_2$  в шихте за вычетом присутствующего его в концентрате и добавив  $\text{SiO}_2$ , потребного для восстановления кремния, должно составлять:

$$m_{\text{кварцита}} = ((m_{\text{CaOк}} + m_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{к}} + m_{\text{SiO}_2\text{к}}) \times B - m_{\text{SiO}_2\text{к}} + m_{\text{SiO}_2}) \times C_{\text{SiO}_2} = 81,4 \text{ кг}$$

Принимается, что примеси в кварците составляют к  $\text{SiO}_2$  отношение 1:1, соответственно состав конечного шлака: 4,2 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 0,7 %  $\text{FeO}$ ; 37,8 %  $\text{SiO}_2$ ; 29,2 %  $\text{MgO}$ ; 25,5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 2,6 %  $\text{CaO}$ .

Окончательный расчётный состав металла представлен в таблице 2.

Таблица 2

Расчет состава металла

	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>сумма</b>
Масса, кг	219,84	134,92	29,0	3,88	387,7
%	56,7	34,80	7,50	1,00	100

Кратность шлака по расчёту составит: 1,31. Состав шихты, кг: хромитовый концентрат — 1000; уголь — 283,4; кварцит — 81,4.

**Применение обжиг-магнитной технологии переработки хромитовых концентратов повышенной железистости с получением стандартного феррохрома**

Вещественный состав технологической пробы БВ-2 месторождения Большая Варака. Химический состав пробы руды приведен в таблице 1, из которой следует, что главным рудным элементом является хром ( $Cr_2O_3$  — 22,8 %), образующий самостоятельную минеральную форму — хромшпинелид.

Таблица 1

Химический состав руды технологической пробы БВ-2

Компоненты	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S <sub>общ.</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO <sub>общ.</sub>	V	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Ni	п.п.п.
Содержание, %	9,81	15	27,4	0,04	<0,1	0,71	5,1	0,62	16,72	0,099	22,8	0,22	0,023	<0,1

С хромшпинелидами связаны марганец, титан и железо. Титан также образует рутил, а железо входит в состав магнетита, возможно гематита, не исключено, что с минералами железа связаны никель и ванадий. Собственные минеральные фазы никеля и ванадия не обнаружены.

Породообразующие компоненты входят в состав плагиоклаза, амфибола, талька и слюды, а кремнезем присутствует в виде самостоятельной минеральной формы — кварца. С ВаО, встречающимся в незначительном количестве, связан барит. Минеральной формой фосфора является апатит.

Исходная руда состоит из трех главных минералов: хромшпинелида, плагиоклаза и амфибола; второстепенных: талька, мусковита, хлорита и кальцита (таблица 2).

Таблица 2

Минеральный состав руды технологической пробы БВ-2

Минерал		Содержание, %
Главные минералы	Хромшпинелид	50
	Плагиоклаз	25
	Амфибол	20
Второстепенные минералы	Тальк	5
	Мусковит	
	Хлорит	
	Кальцит	

В таблице 3 приводится гранулярный состав и распределение  $Cr_2O_3$  по классам крупности в исходной руде, дроблёной до крупности –10+0 мм. Отмечается пониженное содержание  $Cr_2O_3$  для класса крупности –0,044+0 мм, высокая корреляция содержаний  $Cr_2O_3$  и Fe<sub>общ.</sub>

Таблица 3

Гранулярный состав исходной пробы БВ-2, дробленной до крупности  $-10+0$  мм

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %		Распределение, %	
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>общ</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>общ</sub>
-10+6	58,0	24,9	13,9	62,9	62,1
-6+2	17,6	22,6	13,0	17,3	17,6
-2+1	7,2	22,4	12,7	7,0	7,0
-1+0,5	3,4	22,9	13,1	3,4	3,5
-0,5+0,2	2,9	22,2	12,5	2,8	2,8
-0,2+0,1	2,5	22,9	13,2	2,5	2,5
-0,1+0,074	1,9	22,9	12,7	1,9	1,9
-0,074+0,044	1,1	17,0	10,0	0,8	0,9
-0,044+0	6,5	4,5	3,6	1,3	1,8
Исходная руда	100,0	23,0	13,0	100,0	100,0

На основании данных предыдущих исследований [Ракаев, Чепкаленко, 1996] было принято решение о наработке концентрата гравитационным методом с использованием в качестве основного оборудования концентрационных столов. Промпродукт гравитационного обогащения направлялся на электромагнитную сепарацию с целью повышения качества. Схема подготовки пробы к гравитационному обогащению включала в себя стадийное дробление до крупности  $-2+0$  мм. Согласно данным изучения вещественного состава раскрытие рудного минерала начинается в материале крупностью  $-0,5+0,2$  мм. В связи с этим вся масса дроблёной руды подвергалась мокрому грохочению на классы крупности  $-2+0,5$  мм и  $-0,5+0$  мм. Класс крупности  $-0,5+0$  мм направлялся на обогащение на концентрационном столе Holman-Wilfley с выделением концентрата, двух промпродуктов и шламов. Необходимо отметить, что полученные промпродукты различались визуально, высокое количество свободных зерен в первом промпродукте предопределило возможность его перечистки с получением концентрата и промпродукта перечисткой операции, который объединялся со вторым промпродуктом основной операции и направлялся на доизмельчение до крупности  $-0,2+0$  мм в стержневой мельнице. Применение стержневой мельницы обусловлено тем, что степень ошламования продукта в ней существенно ниже, чем в шаровой. Класс крупности  $-2+0,5$  мм, полученный после мокрого грохочения, также измельчался в стержневой мельнице до крупности  $-0,2+0$  мм и направлялся на гравитационное обогащение на концентрационном столе Holman-Wilfley в 3 стадии с получением концентрата, промпродукта, хвостов и шламов. Схема гравитационно-магнитного обогащения пробы БВ-2 приведена на рисунке 1, а результаты обогащения в таблице 4. Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в суммарном гравитационно-магнитном концентрате составляет 43,5 % при извлечении 84,5 %. Содержание FeO при этом составляет 23,6 %, соотношение Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO' — 1,43. Полученный концентрат не соответствует требованиям существующих ГОСТов для получения высокоуглеродистого феррохрома (таблица 5).



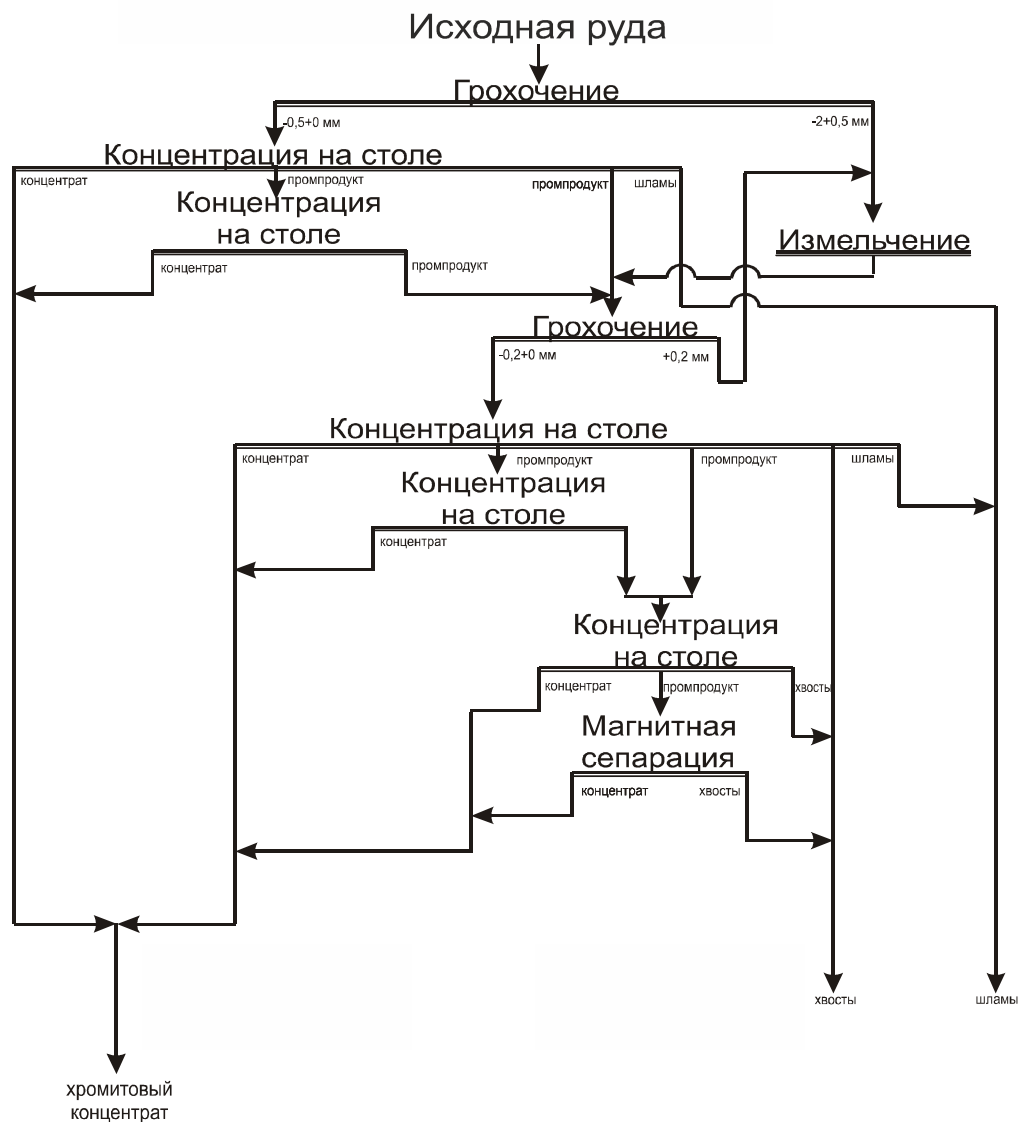


Рисунок 1. Принципиальная схема гравитационно-магнитного обогащения пробы БВ-2

Таблица 4

Результаты гравитационно-магнитного обогащения пробы БВ-2

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>общ</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>общ</sub>
Концентрат гравитационного обогащения класса крупности $-0,5+0\text{ мм}$	25,3	44,2	24,0	48,9	46,6
Концентрат гравитационного обогащения объединенного класса крупности $-0,2+0,044\text{ мм}$	19,0	42,6	23,1	35,6	33,9
Суммарный концентрат	44,3	43,5	23,6	84,5	80,5
Хвосты	31,4	8,0	5,4	11,0	12,9
Шламы	24,3	4,2	3,5	4,5	6,6
Исходная руда	100,0	22,8	13,0	100,0	100,0

## Химический состав концентратов гравитационно-магнитного обогащения пробы БВ-2

Элемент (оксид)	Содержание, %		
	Концентрат 1	Концентрат 2	Суммарный концентрат
MgO	5,17	5,62	5,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,30	14,20	14,26
SiO <sub>2</sub>	3,69	5,32	4,39
K <sub>2</sub> O	0,16	0,19	0,17
CaO	0,77	1,17	0,94
TiO <sub>2</sub>	0,92	0,93	0,92
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	0,17	0,18
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44,20	42,60	43,51
MnO	0,38	0,35	0,37
FeO <sub>общ</sub>	39,72	38,23	39,07
S <sub>общ</sub>	0,032	0,03	0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,1	<0,1	<0,1
NiO	0,02	0,03	0,03

Таким образом, из руды повышенной железистости с содержанием 22,8 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> получен некондиционный для получения стандартного феррохрома по соотношению Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO (<3) концентрат с содержанием 43,5 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Оценена возможность кондиционирования концентрата по соотношению Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO с применением восстановительного обжига с последующей магнитной сепарацией для выплавки феррохрома из немагнитной фракции.

Проведён расчёт шихты для выплавки углеродистого феррохрома, который показал, что полученный металл можно отнести только к сорту «чардж-хром». Опробована технология с предварительным восстановлением окускованного материала в отдельном агрегате с последующим разделением его с помощью магнитной сепарации на магнитную и немагнитную фракции.

Подготовка проб концентрата сводилась к изготовлению брикетов, в состав которых входили рудный материал в смеси с восстановителем и связующим (лигносульфонат), брикетированная смесь восстанавливалась в потоке водорода.

Низкотемпературный обжиг (до 900 °С) проводили на специализированной установке для исследования кинетики восстановления оксидов железа, которая в автоматическом режиме фиксировала изменение массы образца с температурой.

Для высокотемпературного обжига (от 1050 до 1400 °С) использовали печь Таммана.

Параметры брикета:

- состав брикета, г: хромитовый концентрат — 200; коксик — 15; связующее — 8;
- размер брикета, Ф, мм — 20;
- толщина, мм — 10

Брикеты загружались в сетчатую нихромовую (молибденовую) корзинку, через нихромовую нить корзинка подвешивалась к короткому плечу коромысла весов ВЛК-500 и опускалась в реактор (силитовую печь или печь Таммана), разогретый до заданной температуры. Сразу после этого снимали показания весов, а затем в течении 1–2 минут реактор заполняли потоком реакционного газа (водорода). При каждой температуре проведено три опыта. Время одного опыта — 1 час. Магнитная сепарация проводилась в барабанном сепараторе с постоянными магнитами при напряженности 0,1 Тл. В таблице 6 представлены показатели вариантов восстановительного обжига хромитового концентрата с его последующей магнитной сепарацией. Дополнительно проверялось влияние продолжительности выдержки образца в печи на показатели обжига (таблица 6).

Восстановленные брикеты анализировали на содержание  $Cr_{общ}$ ,  $Cr_{мет}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $Fe_{мет}$  по разработанной на заводе «Сибэлектросталь» методике, а степень металлизации рассчитывали по формулам:

$$\mu Cr = (Cr_{мет}, \% / Cr_{общ}, \%) \times 100; \mu Fe = (Fe_{мет}, \% / Fe_{общ}, \%) \times 100.$$

Проведённые эксперименты показали, что для получения материала (таблица 7), пригодного для выплавки углеродистого феррохрома (отношение  $Cr_2O_3/FeO \geq 3,0$ ) в соответствии с ГОСТ 4757-91, необходимо проводить высокотемпературный обжиг исходного сырья при температуре не ниже 1350 °С.

Увеличение времени выдержки при фиксированной температуре (таблица 6, опыт 6) приводит к росту отношения  $Cr_2O_3/FeO$ . Однако, роста времени выдержки даже в два раза оказалось недостаточным для получения необходимого результата.

Ниже приведены результаты опытных плавов на немагнитной фракции предварительно восстановленного хромитового концентрата.

Состав шихты, г:

- материал опыта № 7 — 100 (химический состав представлен в таблице 8);
- коксик — 8;
- кварцит — 6.

Параметры плавки:

- температура в печи — 1800 °С;
- время выдержки — 30 минут.

Таблица 6

Влияние продолжительности восстановительного обжига на его показатели

№ п/п	Режим опыта		Масса магнитной фракции, г	Состав магнитной фракции, %			Извлечение в магнитную фракцию, %		Масса немагнитной фракции, г	Состав немагнитной фракции, %			
	t, °C	Время, мин		Cr	Fe	C	Cr	Fe		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Остальное	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
1	1250	60	37,0	29,1	65,8	4,2	18,0	51,6	152,9	46,60	19,21	34,19	2,42
2	1250	90	38,8	29,9	65,0	4,4	19,5	53,5	150,5	46,50	18,74	35,26	2,48
3	1250	120	42,1	30,2	64,7	4,6	21,4	57,8	146,3	46,76	17,50	35,74	2,67

Таблица 7

Показатели восстановительного обжига концентрата

№ п/п	Режим опыта		Масса магнитной фракции, г	Состав магнитной фракции, %			Извлечение в магнитную фракцию, %		Масса немагнитной фракции, г	Состав немагнитной фракции, %			
	t, °C	Время, мин		Cr	Fe	C	Cr	Fe		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Остальное	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
1	800*	60	2,74	Нет	94,7	4,3	0	5,5	196,6	44,25	29,16	26,59	1,52
2	850*	60	7,7	Нет	95,1	4,4	0	15,5	190,5	45,66	26,90	27,44	1,70
3	950*	60	13,5	13,2	81,7	4,1	3,0	23,3	183,2	46,07	25,41	28,52	1,81
4	1050**	60	21,5	19,4	75,6	4,3	7,0	34,4	173,0	46,77	23,01	30,22	2,03
5	1150**	60	27,2	21,8	73,2	4,0	10,0	42,2	165,7	47,28	21,17	31,55	2,23
6	1250**	60	37,0	29,1	65,8	4,2	18,0	51,6	152,9	46,60	19,21	34,19	2,42
7	1350**	60	52,5	32,9	62,1	4,3	29,0	69,0	132,9	46,50	14,16	39,34	3,28
8	1400**	60	63,3	37,6	57,4	4,5	40,0	77,0	118,2	44,10	11,80	44,20	3,74

Обозначения: \* – опыты проводились на силитовой печи; \*\* – на печи Таммана

Таблица 8

## Химический состав немагнитной фракции

Материал	Содержание, масс. %						Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	
Немагнитная фракция опыта № 7	46,5	14,16	6,61	8,07	21,46	1,41	3,28

Смешанную шихту загружали в графитовый тигель и устанавливали на столик в печи Таммана с температурой 1800 °С. При появлении жидкой фазы выдержка составляла 30 минут. После полного охлаждения тигель разбивался, шлак отделялся от металла, выполнялась подготовка проб и их химический анализ. В таблицах 9 и 10 приведён состав металла и шлака и их масса.

Таблица 9

## Химический состав углеродистого феррохрома

Материал	Содержание, масс. %					
	Cr	Fe	C	Si	P	S
Феррохром	66,31	23,70	7,3	2,2	0,04	0,03

Таблица 10

## Химический состав шлака

Материал	Содержание, масс. %					
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
Шлак	3,17	0,33	31,2	26,54	33,21	4,45

Проведённые опытные плавки показали, что использование металлизированного хромового материала позволяет получить углеродистый феррохром с содержанием хрома выше 65,0 %. Извлечение хрома составило 92 %, кратность шлака — 1,2. Схема переработки хромовых руд повышенной железистости с получением стандартного феррохрома (проба БВ-2) представлена на рисунке 2.

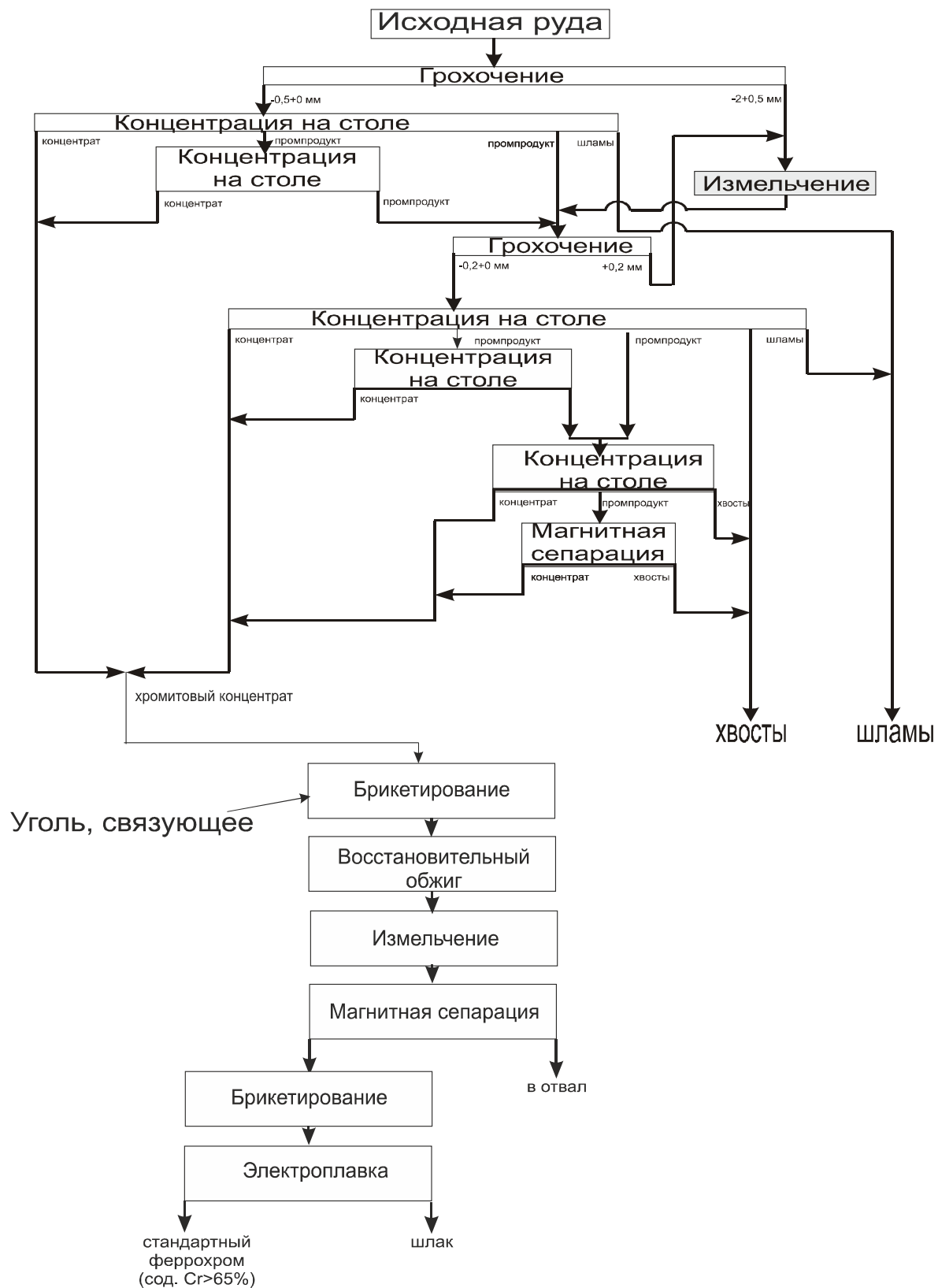


Рисунок 2. Схема переработки высокожелезистых хромовых руд пробы БВ-2

**Определение экономической эффективности переработки высокожелезистых хромовых руд с получением стандартного феррохрома**

Предлагаемая комбинированная схема переработки высокожелезистых хромовых руд с применением обжиг-магнитного способа кондиционирования концентрата обогащения по технологическим показателям, определенным по пробе БВ-2 (месторождение Большая Варака), позволит решить задачу повышения соотношения  $Cr_2O_3/FeO$  в концентратах до значений, при которых станет возможна выплавка стандартного феррохрома, являющегося ликвидной товарной продукцией.

Химический состав хромитового концентрата приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав хромитового концентрата

Компоненты, вес %									
$Cr_2O_3$	$FeO/Fe$	$SiO_2$	$MgO$	$Al_2O_3$	$CaO$	$P_2O_5$	$TiO_2$	$V_2O_5$	$Cr_2O_3/FeO$
43,51	30,35/23,61	4,39	5,36	14,26	0,94	≤0,1	0,92	0,18	1,43

Технологическая схема переработки высокожелезистых хромовых руд включает следующие операции:

- подготовку руды методами дробления и грохочения;
- обесшламливание в гидроциклонах с последующим получением хромитовых концентратов;
- восстановительный обжиг;
- сухую магнитную сепарацию;
- восстановительную плавку хромитовых концентратов с последующим получением стандартного феррохрома.

При добыче и переработке 500 тыс. тонн руды в год годовой выход товарной продукции составит:

- 63,2 тыс. тонн углеродистого феррохрома, марка ФХ800;
- 82,3 тыс. тонн шлакового щебня, ГОСТ 3344-83.

Вышеуказанная производительность принята на базе существующего потребления феррохромовой продукции в России и в мире с учетом перспектив.

***Расчет капитальных затрат и себестоимости производства***

По имеющимся сведениям о глубине залегания и морфологии рудных тел объекта оценки для расчета стоимости добычи руды был принят открытый способ отработки.

Объемы инвестиций в основное технологическое оборудование для переработки хромовых руд определены прямым счетом по данным специалистов ФГБУ «ВИМС».

Общие оценочные инвестиции определены в размере 3 745,4 млн руб., детализированный расчет представлен в таблице 2.

Таблица 2

## Капитальные затраты на строительство предприятия по переработке хромовых руд

Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Стоимость, тыс. руб.
<i>Обогатительный цех (ОЦ)</i>		
Питатель пластинчатый 1-15-120 В	1	2 076,7
Конвейер СМД – 152 - 50	10	5 831,1
Щековая дробилка (ЩДС 6х9)	1	3 508,9
Грохот Metso MF 1861-1 (800х1100)	3	4 879,7
Дробилка конусная ДРО 560Гр	1	2 537,0
Дробилка конусная ДРО 560Т	3	7 611,1
Шаровая мельница с разгрузкой через решетку МОQ 2,1х3,0	2	9 616,2
Гидроциклон ГРЦ-250 (устанавливается батареей)	4	941,2
Концентрационный стол СК4450	20	44 193,6
Концентрационный стол СК4450	30	66 290,4
Конвейер СМД – 152 - 45	17	7 652,0
Сгуститель пластинчатый СП-03	1	1 759,6
Фильтр-пресс ХАЗ-20	19	20 992,0
Итого по ОЦ		177 889,5
<i>Цех переработки хромитового концентрата</i>		
<i>Отделение шихтоподготовки</i>		
Дробилка щековая	2	13 871,9
Грохот	3	15 590,5
Мостовой кран	2	62 423,5
Система конвейеров	2	30 342,2
Брикет-пресс	2	52 009,3
Дозаторы	4	78 034,4
Магнитный сепаратор	2	1 043,5
Вращающаяся печь	1	72 827,4
<i>Склад готовой продукции</i>		
Дробилка	1	13 871,9
Бункера для хранения	6	43 334,3
Весовое хозяйство	1	3 897,6
Электрокара	2	1 739,1
Таль	3	3 897,6
Участок выплавки углеродистого феррохрома		0,0
Печь типа РКО-21	2	520 175,0
Трансформатор	2	138 718,8
Ковшовое хозяйство	1	43 344,5
Разливочная машина	1	52 019,6
Мостовой кран	2	83 231,3
Система газоочистки	1	121 368,7
ЦЗЛ лабораторное оборудование	1	29 472,6
Ремонтно-механические, электромеханические, транспортные, изготовление кожухов и др.	1	74 556,2
Ж/д транспорт	1	55 487,5
Электроподстанция	1	104 028,9
Итого по ЦПХК		1 615 286,3
Итого по оборудованию		1 793 175,8
Вспомогательное оборудование		89 658,8
Итого основное и вспомогательное оборудование		1 882 834,6
Прочее неучтенное оборудование		188 283,5



Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Стоимость, тыс. руб.
Итого оборудование		2 071 118,0
Транспортно-заготовительные расходы		310 667,7
Монтаж оборудования		414 223,6
Строительные и прочие затраты		1 035 559,0
Капитальные затраты		3 831 568,3

Укрупненная оценка первоначальных инвестиций представлена в таблице 3.

Таблица 3

Капитальные затраты на организацию производства

Статьи затрат	Стоимость, млн руб.
Основное оборудование	1 793,2
Вспомогательное оборудование	89,7
Прочее оборудование	188,3
Транспортно-заготовительные расходы	310,7
Монтаж оборудования	414,2
Строительные и прочие затраты	1 035,6
ИТОГО	3 745,4

Экономическая эффективность рассчитана для технологической схемы переработки высокожелезистых хромовых руд, включающей:

- подготовку руды;
- обесшламливание в гидроциклонах с последующим получением хромитовых концентратов;
- восстановительный обжиг;
- сухую магнитную сепарацию;
- восстановительную плавку хромитовых концентратов с получением стандартного феррохрома.

Явочная численность трудящихся в основных и вспомогательных производствах определена в соответствии с расстановкой персонала по рабочим местам.

Принят следующий режим работы предприятия:

- количество рабочих дней в году — 330;
- продолжительность смены, час — 8;
- количество смен в сутки — 3;

В экономических расчетах учтен дополнительный отпуск за работу в районах Крайнего Севера.

Расчет фонда оплаты труда персонала выполнен на основе данных Росстата за 2018–2019 гг. о среднемесячной заработной плате по субъектам Российской Федерации и о среднемесячной заработной плате по видам экономической деятельности (металлургическое производство и производство готовых металлических изделий). Среднемесячная заработная плата работников на металлургическом производстве в Мурманской области определяется в значении 64,92 тыс. руб., что принято за основу для расчета ФОТ.

Ставки страховых взносов в Пенсионный Фонд Российской Федерации — 22 %, в Фонд социального страхования Российской Федерации — 2,9 %, в Федеральный фонд обязательного медицинского страхования — 5,1 %.

Страховые тарифы на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний принимаются согласно закона от 22.12.2005 № 179-ФЗ — 1,9 %.

Ставка налога на имущество составляет 2,2 % от остаточной стоимости основных фондов предприятия.

Принятая ставка налога на добычу полезных ископаемых составила 8 % от стоимости добытых полезных ископаемых.

Стоимость вспомогательных материалов, реагентов и энергетических ресурсов принята по стоимости продукции, действующей на рынке РФ, в текущих ценах 2019 г.

Укрупненная калькуляция затрат на переработку высокожелезистой хромовой руды представлена в таблице 4.

Таблица 4

Годовые затраты на переработку высокожелезистой хромовой руды

Статьи затрат	Затраты в год млн руб.
Руда	415,1
Материалы и реагенты	747,8
Амортизация	335,9
Энергозатраты	901,8
Текущий ремонт	134,4
Заработная плата	374,9
Начисления на зарплату	125,1
Налоги	321,5
Общепроизводственные расходы	654,5
Общехозяйственные расходы	318,1
Коммерческие расходы	11,2
<b>ИТОГО</b>	<b>4 340,3</b>

Эксплуатационные затраты определены с учетом переработки руды до получения конечной товарной продукции. Себестоимость переработки 1 тонны руды составила 8 883,4 руб.

Полный расчет затрат на переработку руды представлен в таблице 5.

Таблица 5

Расчет годовых затрат предприятия по переработке хромовых руд

Показатели	Удельный расход, норма	Ед. изм.	Количество	Цена за единицу, руб.	Затраты (стоимость) на объем, тыс. руб.
Руда		тыс. т	500		
Товарная продукция, в т.ч.:					
– углеродистый феррохром марки ФХ800		тыс. т	63,2	94 041,7	5 943 433,3
– шлаковый щебень		тыс. т	75,5	534,3	40 337,1

Показатели	Удельный расход, норма	Ед. изм.	Количество	Цена за единицу, руб.	Затраты (стоимость) на объем, тыс. руб.
Итого по товарной продукции					5 983 770,5
1. Руда				863,5	431 749,8
2. Материалы и реагенты					747 771,6
Участок 1					
– расходные шары	0,59	т	295,0	29 750,0	8 776,3
– футеровка	0,0006	т	0,3	102 310,0	30,7
Участок 2					
– уголь	0,96	т	60,5	1 250,0	75 581,7
– кварцит	0,0037	т	0,2	6 250,0	1 454,0
– лигносульфонат	0,1401	т	8,9	27 120,0	240 156,6
– электродная масса	0,03	т	1,9	30 000,0	56 880,0
– природный газ (вар. 2)	604,9	тыс. нм <sup>3</sup>	38 230,51	4 441,7	169 807,2
Итого					552 686,4
Транспортно-заготовительные расходы (материалы и реагенты)	10,0 %				37 407,2
ЖД транспортировка концентрата до Петрозаводска					157 678,0
Итого					747 771,6
3. Амортизация					335 887,8
4. Энергозатраты, в т.ч.					964 994,6
– электроэнергия на обогащение	13,9	кВт*ч	6 950 180,2	3,1	21 843,4
– электроэнергия на металлургический передел	4650,9	кВт*ч	293 935 047,2	3,1	923 795,9
– вода техническая	3,74	м <sup>3</sup> /т	1 870 000,0	2,9	5 441,7
– вода свежая	0,46	м <sup>3</sup> /т	230 000,0	44,2	10 168,3
– прочие неучтенные	10,0 %				3 745,3
5. Текущий ремонт	40,0 %				134 355,1
6. Заработная плата					374 945,5
7. Начисления на зарплату					125 071,9
8. Налоги в т.ч.					322 428,1
– НДС	4,8 %				287 221,0
– платежи за сбросы и выбросы загрязняющих веществ	1,0 %				23 471,4
– прочие	0,50 %				11 735,7
Итого					3 437 204,5
9. Общепроизводственные расходы	19,5 %				669 936,7
Итого					4 107 141,2
10. Общехозяйственные расходы	7,9 %				323 326,1
11. Коммерческие расходы	3,0 %				11 248,4
Всего					4 441 715,7

В экономических расчетах применены средние цены на углеродистый феррохром марки ФХ800 — 94 042 руб./т (без НДС) и шлаковый щебень ГОСТ 3344-83 — 534,3 руб./т (без НДС) в России по состоянию на 2019 г.

Для обеспечения стабильной работы предприятия величина оборотных средств (запасы сырья, материалов и запчастей) принимается равной величине двух месячных операционных расходов и учитывается в расходной части первых лет эксплуатации и в доходной части последнего расчетного года.

#### **Экономические показатели**

В результате переработки руды по предложенной технологической схеме при выходе на полную производственную мощность предполагается получение выручки в размере:

– 5 943,4 млн руб. от реализации 63,2 тыс. тонн/год углеродистого феррохрома марки ФХ800;

– 40,3 млн руб. от реализации 82,3 тыс. тонн/год шлакового щебня.

Основные показатели экономической эффективности за расчетный период характеризуются положительными значениями (таблица 6).

Таблица 6

Основные показатели экономической эффективности

<b>Ставка дисконтирования</b>	<b>15,0 %</b>	<b>10,0 %</b>
Индекс доходности	1,58	2,05
Дисконтированный срок окупаемости капитальных вложений, лет	8,0	7,0
ЧДД, млн руб.	2774,5	5534,7
Недисконтированный срок окупаемости капитальных вложений, лет	5,9	
Внутренняя норма доходности	26,0%	

Детализированные технико-экономические показатели представлены в таблице 7.

Таблица 7

Основные технико-экономические показатели проекта по переработке хромовых руд

<b>№№ п/п</b>	<b>Наименование показателей</b>	<b>Единица измерения</b>	<b>Значение</b>	
			<b>За расчетный период</b>	<b>На год выхода на производственную мощность</b>
1	Руда	тыс. т	8 750,0	500,0
2	Расчетный период	лет	20	
3	Продукция			
	углеродистый феррохром марки ФХ800	тыс. т	1 106,0	63,2
	шлаковый щебень	тыс. т	1 661,0	75,5
4	Капитальные затраты	млн руб.	6 616,8	4 513,1
5	Товарная продукция	млн руб.	104 716,0	5 983,8
	Извлечение углеродистого феррохрома марки ФХ800 от исходной руды	%	12,64	
	углеродистый феррохром марки ФХ800	млн руб.	104 010,1	5 943,4
	выход шлакового щебня от исходной руды	%	15,10	
	шлаковый щебень	млн руб.	705,9	20,2

№№ п/п	Наименование показателей	Единица измерения	Значение	
			За расчетный период	На год выхода на производственную мощность
6	Эксплуатационные расходы	руб./т руды	8 695,2	8 680,6
	– материалы и реагенты		1 495,5	1 495,5
	– энергозатраты		1 803,6	1 803,6
	– текущий ремонт		272,9	268,7
	– амортизация		682,2	671,8
	– заработная плата		749,9	749,9
	– начисления на зарплату		250,1	250,1
	– налоги и платежи		643,0	643,0
	– общепроизводственные расходы		1 309,0	1 309,0
	– общехозяйственные расходы		636,2	636,2
	– коммерческие расходы		22,5	22,5
7	Полные затраты за расчетный период	млн руб.	76 082,7	4 340,3
	– материалы и реагенты	млн руб.	13 086,0	747,8
	– энергозатраты	млн руб.	15 781,6	901,8
	– текущий ремонт	млн руб.	2 387,7	134,4
	– амортизация	млн руб.	5 969,2	335,9
	– заработная плата	млн руб.	6 561,5	374,9
	– начисления на зарплату	млн руб.	2 188,8	125,1
	– налоги и платежи	млн руб.	5 625,9	321,5
	– общепроизводственные расходы	млн руб.	11 453,6	654,5
	– общехозяйственные расходы	млн руб.	5 566,5	318,1
	– коммерческие расходы	млн руб.	196,8	11,2
8	Цена товарной продукции	млн руб.		
	углеродистый феррохром марки ФХ800	руб./т	94 041,7	94 041,7
	шлаковый щебень	руб./т	534,3	534,3
9	Затраты на 1 руб. товарной продукции	руб.	0,73	0,73
10	Валовая прибыль	млн руб.	28 633,3	1 643,5
11	Налог на имущество	млн руб.	494,2	63,8
12	Налогооблагаемая прибыль	млн руб.	28 139,1	1 579,7
13	Налог на прибыль	млн руб.	5 627,8	315,9
14	Чистая прибыль	млн руб.	22 511,3	1 263,7
15	Внутренняя норма доходности	%		27,7
16	Срок окупаемости (простой)	лет		5,7
17	Ставка дисконтирования	%		15,0
17.1.	Чистый дисконтированный доход	млн руб.		3 201,3
17.2.	Индекс доходности			1,7
17.3.	Дисконтированный срок окупаемости инвестиций	лет		7,5
18	Ставка дисконтирования	%		10,0
18.1.	Чистый дисконтированный доход	млн руб.		6 130,0
18.2.	Индекс доходности			2,2
18.3.	Дисконтированный срок окупаемости инвестиций	лет		6,7

Из представленных данных о себестоимости переработки следует, что основными факторами являются цена на феррохром ФХ800 и удельные затраты на производство, из которых наибольшее влияние на ЧДД оказывают затраты на электричество и на природный газ.

При данных показателях экономической эффективности рудо-перерабатывающего комплекса, с учетом возможности использования природного газа при переработке хромитового концентрата на пирометаллургическом переделе, а также увеличения цены на основной товарный продукт на 15–20 %, в том числе за счет частичной реализации феррохрома на мировом рынке, цена на котором выше на 20–40 %, чем на российском. Проект добычи и переработки высокожелезистых хромовых руд можно рассматривать как в достаточной степени эффективный.

## **ЛИТЕРАТУРА**

Ракаев А.И., Чепкаленко Н.А. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на хромовые руды и другие полезные ископаемые на участке «Большая Варака», выполненных в 1993–1996 гг. Книга III. Изучение обогатимости и технологические исследования хромовых руд Большой Вараки и ваннадий-железо-титановых руд Северо-Тихозерского проявления. АОТ «Центрально-Кольская экспедиция». Мончегорск, 1996, 149 с.

Подписано в печать 20.10.2020 г.  
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 2,7  
Тираж 10 экз. Заказ № 15

Редакционно-издательский сектор (РИС) ВИМС.  
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31. Тел. (495) 9503570  
Отпечатано на ризографе в РИС ВИМС.