

УДК 541.1

*В.В. Кармазин, С.Н. Жилин, В.А. Измалков,  
А.С. Опалев, С.И. Кретов, Р.В. Ковалев*

**РАЗРАБОТКА МОКРЫХ МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ  
ДЛЯ СТАДИАЛЬНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАТА  
НА ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИКАХ СОВРЕМЕННЫХ  
ГОРНООБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ**

---

**В** современных условиях на первый план выходит не столько наличие в стране сырьевой, сколько наличие высокой технологической и технической базы для переработки сырья в дорогостоящую готовую продукцию. Особо следует отметить уже сложившуюся в мире устойчивую ситуацию зависимости продавца сырья от его покупателя [1-3]. В связи с этим, страны, обладающие богатыми месторождениями, но не способные произвести из них конечные изделия, рискуют превратиться в сырьевые придатки более развитых стран.

Уникальная сырьевая база магнетитовых кварцитов, перерабатываемых на ОАО «Лебединский ГОК», позволяет производить высококачественные концентраты (ВКК) по магнитной схеме. Эта технология сегодня включает четыре стадии измельчения и десять стадий обогащения (семь – на обычных секциях производства рядового концентрата и три – на доводочной фабрике).

Мокрая магнитная сепарация измельченных магнетитовых кварцитов способна выделить в отдельный продукт только немагнитные зерна пустой породы, а вся рудная смесь (зерна магнетита, богатые и бедные сростки) переходит в магнитный продукт (концентрат), который при этом захватывает и немагнитные зерна пустой породы за счет магнитной флокуляции

сильно-магнитных зерен. Таким образом, к семи точкам сброса отходов на рядовых секциях основной фабрики добавляется еще три на доводочной фабрике, что ведет к потере массы концентрата (более 3 %), при этом высоки эксплуатационные расходы, в частности электроэнергии, (наиболее энергоемким является измельчение, которое при получении ВКК осуществляются в четыре стадии) [2-5]. Известно, что на 1 % повышения качества концентрата при его доводке теряется 3 % извлечения металла в концентрат.

Между тем, как это следует из описания исходной руды, уже после первой стадии измельчения в ней более трети измельченного магнетита находятся в виде свободных зерен, т. е. оказываются раскрытыми. При содержании в руде чуть более 32 % Fe, в концентрате первой стадии магнитной сепарации его содержание не превышает 57 % Fe, а в классе -0,045 мм этого же продукта содержится более 64 % Fe при выходе его более 43 %. Микроскопический анализ этого же продукта показывает, что в его составе находится более 80 % магнетита, более 1 % сростков и вкрапленников, а остальное кварц и зерна пустой породы [6-9].

В связи с этим, основной задачей нашей работы стало решение проблемы стадийного выделения магнетита и богатых сростков, т. е. высококачественного концентрата

– ВКК [1]. Для этой цели, в первую очередь была необходима разработка и промышленная проверка опытного образца магнитного сепаратора, способного выделять из продуктов измельчения руды в первой стадии часть раскрытого магнетита в виде зернистого концентрата. Это означает, что из концентрата первой стадии можно выделить до 30 % по выходу ВКК, содержащего около 69 % Fe, направив его прямо на обезвоживание и окомкование перед горячим брикетированием железа (ГБЖ) [3, 6].

*Если учесть, что выход концентрата ММС рослее первой стадии превышает 54% от исходного, то с выделение ВКК в голове технологической схемы освободит около 15 % технологических мощностей после первой стадии, как резерв для наращивания производительности фабрики и даст большую экономию электроэнергии за счет сужения фронта измельчения, не говоря уж о снижении при этом капитальных и эксплуатационных затрат.*

В ходе исследований было проведено определение принципиальной технологической возможности получения продукта высокого качества по общему железу. Это было сделано на полупромышленном сухом магнитном центробежном сепараторе 11KL – «Лаурилла». Без специальной настройки, в первом же эксперименте на этом сепараторе был получен концентрат, содержащий 69,47 % Fe<sub>общ</sub>, при выходе 32 %, что доказало реальную возможность решения поставленной задачи [3], но само ее решение оказалось очень не простым.

Были изучены следующие возможные подходы:

- управление ростом флоккул в условиях перемешивания, когда в их ядро попадают только чистые магнетитовые зерна и такие флоккулы переходят затем в концентрат;
- постоянное разрушение флоккул в процессах сепарации;
- разрушение флоккул между процессами сепарации;

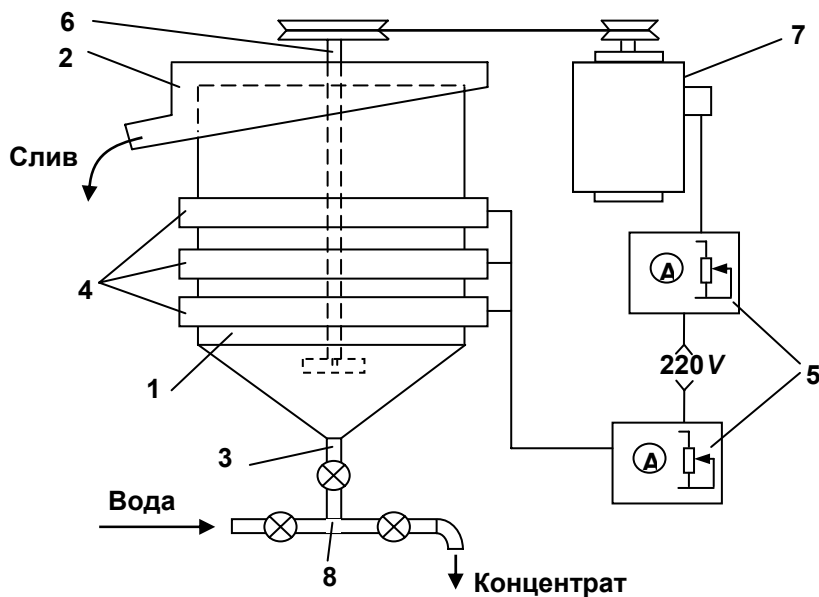
- ослабление флокулообразования за счет снижения напряженности внешнего намагничивающего поля в сепараторе;

- очистка магнетитовых флоккул от зерен пустой породы механическими воздействиями на их структуру.

Каждый из этих подходов имеет как свои преимущества, так и свои недостатки, но задачей предстоящего исследования является создание такого сепаратора, который использовал бы преимущества каждого из названных подходов в оптимальной их комбинации для получения чистого магнетитового концентрата. В этом случае необходимо установить частоту и напряженность магнитного поля, скорость движения сепарируемого магнитного слоя. Главной идеей описанных ниже исследований было разрушение флоккул при их просачивании сквозь немагнитную сетку в магнитном поле.

В качестве первой конструкции была изучена прямоточная конструкция магнитного шлюза, разделенного по горизонтали латунной сеткой с ячейкой 100 мкм, способного достигать высокой удельной производительности. На искусственной смеси («магнетит-кварц» 4:1) результаты разделения оказались удовлетворительными, однако на реальных продуктах магнитный продукт оказывался засоренным сrostками. Работы над этой модели продолжают. Более завершёнными оказались результаты испытаний моделей с высоко-интенсивным магнитным перемешиванием.

Вторая предлагаемая и исследуемая конструкция рис. 1 представляет собой магнито-гравитационный сепаратор периодического действия (магнитный турбоциклон типа «бочки Зеленова»). Слабое магнитное поле поддерживает во взвешенном состоянии ленточные струйки флоккул, при этом они совершают вращательное движение, высвобождаясь при этом от немагнитной (породной) фракции [1].



**Рис. 1. Лабораторный магнито-гравитационный сепаратор периодического действия:**  
 1 – цилиндрический корпус; 2 – сливной желоб; 3 – разгрузочный патрубок; 4 – соленоидные катушки; 5 – источник питания; 6 – лопастная мешалка; 7 – двигатель с регулируемым числом оборотов; 8 – система вентилей

При напряженности поля в рабочем пространстве  $\sim 400$  Э на неклассифицированном материале исходной пробы позволил получить концентрат с 63,72 % Fe, на классифицированном по классу 0,14 мм – 66,75 % Fe при выходе в обоих случаях более 70 %. При испытаниях этого варианта в поле  $\sim 40$  Э были получены: немагнитный продукт в виде шламистой и зернистой части с общим выходом  $\sim 10$  % и практически с нулевым содержанием железа и магнитный – с содержанием Fe  $\sim 64,5$  %.

В последующих сериях опытов, после снижения средней индукции до 150 - 200 Э в зернистую часть немагнитной фракции поступал сростковый материал и ее выход увеличился вдвое, что по балансу металла свидетельствует о повышении качества магнитного продукта. Результаты опытов представлены на рис. 2 и табл. 1.

В качестве третьего и основного предлагаемого варианта предлагается сепара-

тор оригинальной конструкции, в котором за счет бегущего магнитного поля флоккулы катятся по рабочей поверхности и очищаются от сростков, проходя через деструктурирующие немагнитные сетки. При относительном движении рабочей поверхности и магнитной системы с чередующейся полярностью в направлении движения, вектор напряженности поля вблизи поверхности совершает вращение, то есть возникает явление «бегущего» магнитного поля. Флоккулы, ориентируясь вдоль силовых линий, также совершают вращательное движение вокруг точки касания с рабочей поверхностью и таким образом перекатываются вдоль своей длинной оси по поверхности навстречу движению магнитной системы. Частота вращения вектора поля и соответственно флокул прямо пропорциональна линейной скорости движения магнитной системы относительно поверхности и обратно пропорциональна шагу полюсов.

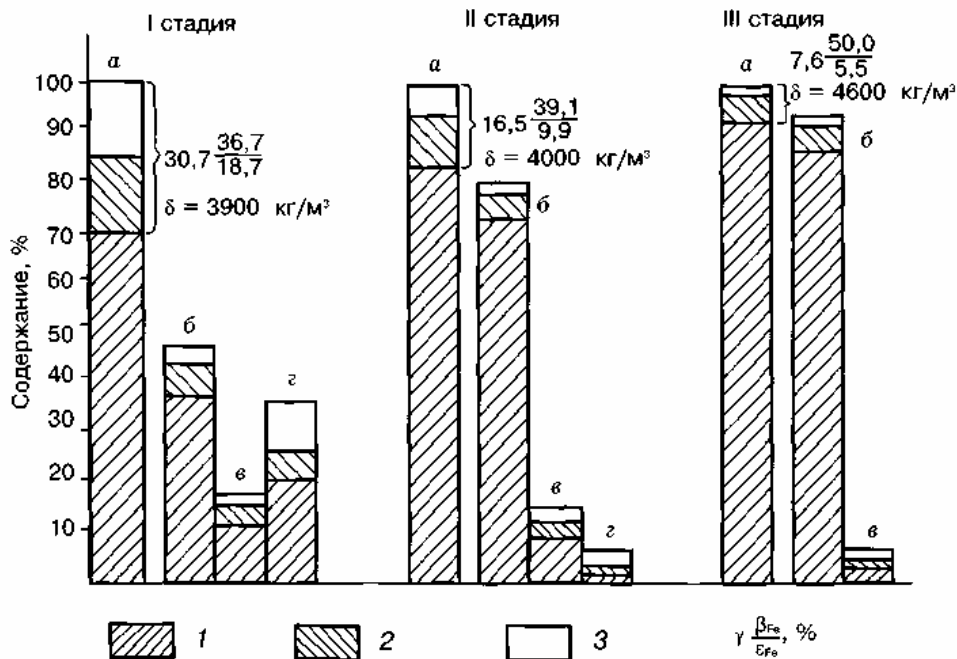


Рис. 2. Вещественный состав магнетитовых концентратов I-III стадий обогащения, содержащих 60,0, 64,9 и 68,5 % Fe соответственно (а – концентрат в целом; б – класс – 44 мкм; в – класс – 71+44 мкм; з – класс + 71 мкм): 1 – свободный магнетит; 2 – магнетит в сростках с нерудными минералами; 3 – нерудные минералы в сростках с магнетитом

Таблица 1

Классы крупности, мкм	Концентрат						Хвосты (слив)					
	Выход класса, %		Содержание, %		Извлечение Fe, %		Выход класса, %		Содержание, %		Извлечение Fe, %	
	от концентрата	от питания сепарации	Fe	SiO <sub>2</sub>	от концентрата	от питания сепарации	от слива	от питания сепарации	Fe	SiO <sub>2</sub>	от слива	от питания сепарации
Концентрат III магнитной сепарации												
+50	14,5	13,3	63,5	—	13,2	12,8	45,2	3,7	11,0	—	20,7	0,6
-50	85,5	78,5	70,8	—	86,8	84,3	54,8	4,5	33,8	—	79,3	2,3
Всего	100,0	<b>91,8</b>	<b>69,7</b>	3,1	100,0	<b>97,1</b>	100,0	<b>8,2</b>	<b>23,5</b>	56,7	100,0	<b>2,9</b>
Концентрат V магнитной сепарации												
+50	2,7	2,55	56,7	—	2,2	2,1	33,3	1,8	13,2	—	10,7	0,3
-50	97,3	92,05	70,7	—	97,8	95,1	66,7	3,6	47,2	—	89,3	2,5
Всего	100,0	<b>94,6</b>	<b>70,3</b>	2,1	100,0	<b>97,2</b>	100,0	<b>5,4</b>	<b>35,0</b>	43,6	100,0	<b>2,8</b>

При образовании флокул в магнитном поле сепаратора в них, за счет магнитных, механических, адгезионных сил захватывается часть частиц с пониженной магнитной восприимчивостью – сростки даже

немагнитные частицы пустой породы. При движении слоя флокул за счет движения рабочего органа или бегущего поля в рабочей зоне сепаратора флокулы не полностью освобождаются от пустопородных и

бедных сростковых частиц. Практика показывает, что гидромеханических, центробежных, вибро-акустических и других конкурирующих с магнитными сил при существующих способах мокрой магнитной сепарации не достаточно для полного разделения частиц концентрата и хвостов (промпродукта). Поэтому высокое качество концентрата достигается многократными перечистками с классификацией по крупности [7].

В предложенном нами способе сепарации, на флокулы в процессе их движения воздействуют таким образом, что их целостность нарушается, они деструктурируются, а затем магнитные частицы вновь формируют флокулы и продолжают движение. При этом частицы сростков и пустой породы высвобождаются из флокул и под действием струй промывной воды, центробежных и гравитационных сил удаляются из рабочей зоны. Это обеспечивается установкой на пути флокул, поперек их движению, т.е. поперек тяговому градиенту магнитного поля, сеток из немагнитного материала, с размером ячейки больше максимальной крупности зерна и меньше минимального размера флокулы. Таким образом, в процессе периодического разрушения флокул и перегруппировки частиц в новые флокулы содержание полезного компонента в них возрастает.

На рис. 3 показан магнитный сепаратор, разработанный авторами для осуществления выше описанного способа магнитного обогащения руд, включающий магнитную систему 1 на постоянных магнитах 4, с кожухом 2, расположенных в корпусе 3, патрубки подачи исходного питания 5 и промывной воды 6, сетки для реструктурирования и очистки флокул 7, сливной желоб 8 с патрубком 9, патрубком 10 для выпуска хвостов и концентратного патрубка 11.

Магнитные частицы исходного материала, поступающего в виде пульпы в зону действия магнитного поля структурируются с образованием множества флокул. Во флокулы, кроме частиц раскрытого магнитного минерала захватываются частицы сростков и пустой породы. При движении полюсов магнитной системы 1 с чередующейся полярностью на рабочей поверхности 2 создается бегущее магнитное поле и под его действием образовавшиеся флокулы 5 начинают двигаться, перекатываясь по поверхности вдоль своей длинной оси навстречу движению полюсов. Проходя через установленную поперек движения сетку 3, флокулы деструктурируются (разрушаются), при этом частицы концентрата освобождаются от немагнитных и слабомагнитных частиц, зернистые фракции которых опускаются вниз, а шламистые вверх. Струи промывной воды интенсифицируют процесс. Пройдя сквозь сетку, очищенные магнитные частицы вновь группируются во флокулы, продолжают движение, а затем отводятся в зону, где отсутствует поле, для разгрузки.

Магнитный сепаратор работает следующим образом (рис. 2). Исходное питание в виде пульпы через патрубки 5 (на рис. 2 питающих патрубков два) подается на рабочую внешнюю поверхность, вертикально установленного кожуха-обечайки 2, внутри которого расположена круговая вращающаяся магнитная система 1. Кожух с магнитной системой располагается в корпусе 3. Вращающаяся магнитная система на основе постоянных магнитов 4 чередующееся полярности (N-S-N-S...) создает бегущее магнитное поле, характеризующееся вращением вектора напряженности в каждой точке рабочей поверхности кожуха. Немагнитные частицы под действием гравитационных сил опускаются на дно корпуса и разгружаются

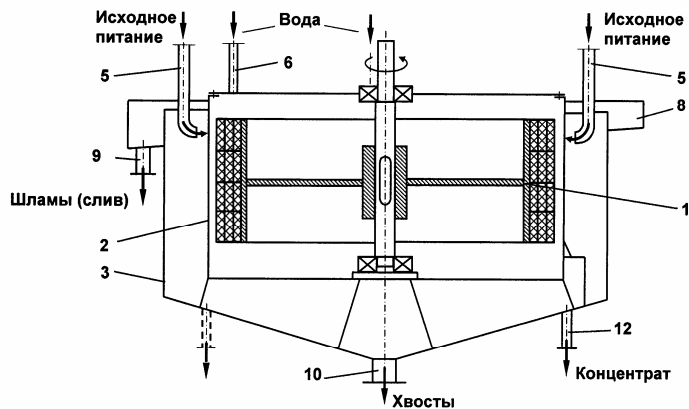
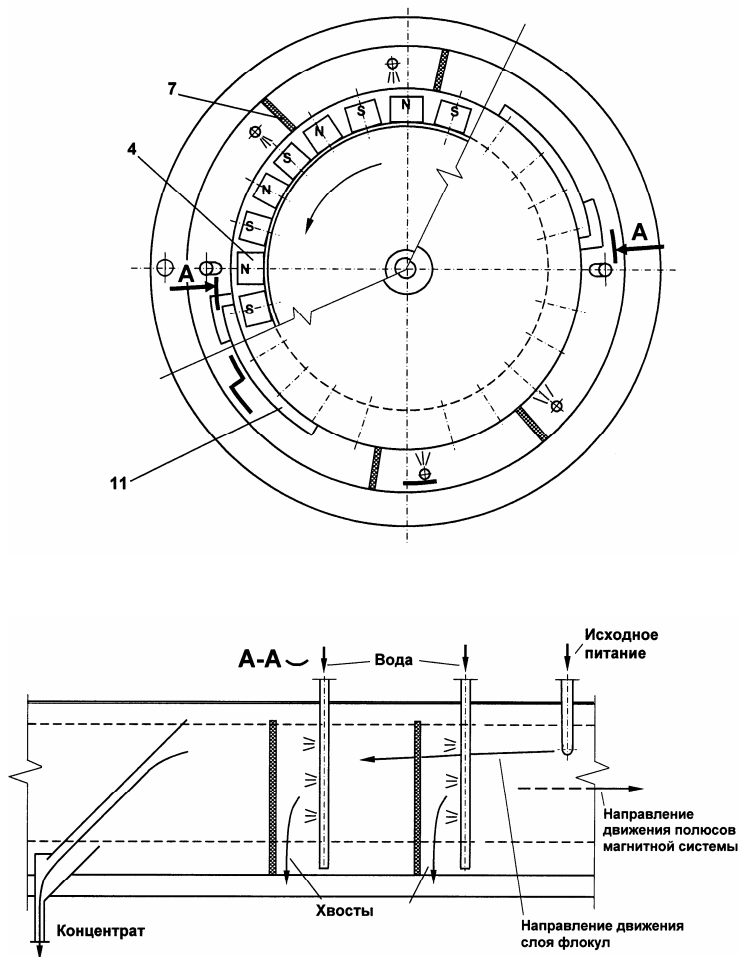
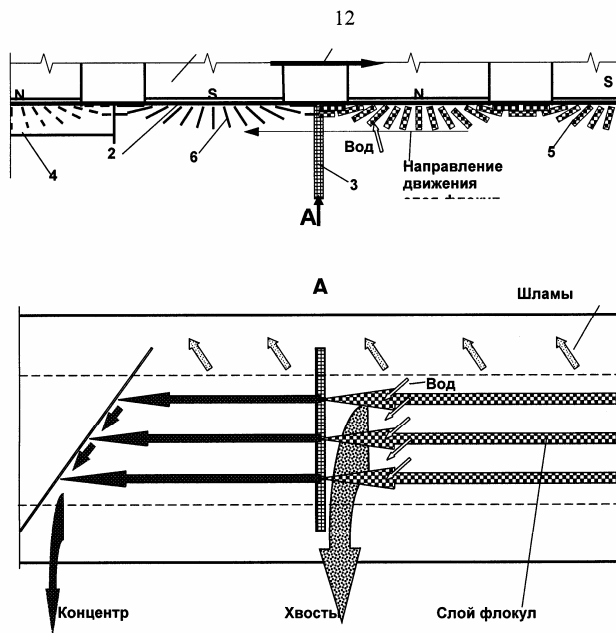


Рис. 3. Экспериментальная модель высокоселективного магнитного сепаратора с безущим полем (ВСМС): 1 - магнитная система; 2 - кожух; 3 - корпус; 4 - постоянные магниты; 5, 6 - патрубки подачи исходного питания и промывной воды; 7 - сетки для реструктурирования и очистки флокул; 8 - сливной желоб; 9 - патрубок; 10 - патрубок для выпуска хвостов; 11 - концентратор патрубка



через патрубок 10, а слой флокул, образовавшихся в магнитном поле из частиц магнитной фракции и притянувшийся к поверхности кожуха, начинает двигаться навстречу движению полюсов магнитной системы. Флокулы под действием тягового градиента магнитного поля, проходя через сетки 7, разрушаются - деструктурируются, а струи воды из коллекторов 6 вымывают при этом пустопородные и сростковые частицы, которые также опускаются вниз и разгружаются через патрубок 10. Шламистые частицы за счет восходящего потока воды поднимаются вверх, поступают в кольцевой желоб 8 и разгружаются через патрубок 9. Пройдя сквозь сетку, очи-

**Рис. 4. Схема модели, включающая:** 1 – магнитную систему; 2 – рабочую поверхность с движущимися флоккулами 5, 6; 3 – сетку; 4 – направляющую



сбившиеся магнитные частицы вновь формируются в слой флокул, который спиральной направляющей 11 выводится из зоны действия магнитного поля вниз и разгружаются через концентратный патрубок 12.

В испытываемом сепараторе посредством вращения магнитной системы на постоянных магнитах чередующейся полярности создается «бегущее магнитное поле» вблизи внутренней стенки цилиндрического корпуса при этом вектор напряженности в каждой точке поверхности корпуса совершает вращение, один полный оборот на 360° при смене полярности N-S-N, т.е. при повороте системы на два шага – N-S, S-N.

Частицы магнитоактивного материала (минерала), поступаая вместе с исходным материалом через патрубок, флокулируют в магнитном поле и начинают двигаться, перекаатываясь по стенке корпуса навстречу вращению магнитной системы. При движении слой флокул под действием гидромеханических сил, струй промывной воды (патрубки 9) освобождаются от немагнитных и сростковых фракций, которые опускаются в нижнюю часть камеры (корпуса) и разгружаются через патрубок 11.

При прохождении флокул через сетки 9 происходит процесс механической де-

флокуляции, а затем повторная флокуляция, что позволяет повысить эффективность процесса разделения частиц по магнитным свойствам. С помощью спиральной направляющей 8 флокулы выводятся из зоны действия магнитного поля и поступают концентратный отсек (сборник 7). Шламистая часть сепарируемого материала разгружается в желоб 3.

**Таблица 2**  
**Основные конструктивно-технологические параметры сепаратора**

Производительность по твердому исходному, т/ч	5
Напряженность магнитного поля на поверхности рабочего органа, кА/м	20
Диаметр рабочего органа, мм	900
Длина рабочего органа, мм	500
Номинальная мощность электродвигателя привода магнитной системы, кВт	4,0
Габаритные размеры, мм,	
длина	1500
ширина	1500
высота	1800
Масса сепаратора, кг	950





Таблица 4  
 Данные анализов при испытаниях ВСММС ( $Fe_o/Fe_n$ )  
 (условия см. табл. 3 с примечанием)

№ опыта	Шифр пробы	Продукт	Результат
1	Ри 50	Слив	17,79/6,74
	Ри 51	Промпрод.	53,4/ –
	Ри 52	Концентрат	59,34/ –
2	Ри 53	Слив	22,43/12,29
	Ри 54	Промпрод.	62,75/ –
	Ри 55	Концентрат	67,66/ –
3	Ри 56	Слив	
	Ри 57	Промпрод.	52,4/ –
	Ри 58	Концентрат	59,35/ –
4	Ри 59	Слив	13,82/1,91
	Ри 60	Промпрод.	52,32/ –
	Ри 61	Концентрат	62,19/ –
5	Ри 62	Слив	14,02/1,7
	Ри 63	Промпрод.	63,11/
	Ри 64	Концентрат	69,5/–
6	–	Слив	–
	Ри 876	Промпрод.	55,85/52,15
	Ри 877	Концентрат	64,88/61,55
7	–	Слив	–
	Ри 879	Промпрод.	64,08/60,95
	Ри 880	Концентрат	67,3/65,25
8	Ри 940	Слив	18,84/7,79
	Ри 939	Промпрод.	56,22/52,15
	Ри 938	Концентрат	65,61/62,37
9	Ри 943	Слив	18,54/7,92
	Ри 942	Промпрод.	58,62/55,01
	Ри 941	Концентрат	66,09/62,97
10	Ри 946	Слив	16,37/4,79
	Ри 945	Промпрод.	57,02/52,48
	Ри 944	Концентрат	65,21/62,90

Частота вращения магнитной системы и соответственно частота «бегущего» поля регулируется с помощью привода – двигателя постоянного тока и источника электропитания. Контроль частоты осуществ-

ляется при помощи секундомера или счетчика оборотов.

$$n_n = v/2S = \pi D n_c / 2S,$$

где  $n_n$  – частота вращения вектора магнитного поля;  $v$  – линейная скорость магнитной системы;  $S$  – шаг полюсов магнитной системы;  $D$  – диаметр магнитной системы;  $n_c$  – частота вращения магнитной системы

На рис. 4 показана рабочая зона устройства для реализации нового способа магнитного обогащения руд, включающая магнитную систему 1; рабочую поверхность 2 с движущимися флокулами 5, 6; сетку 3; направляющую 4.

На схеме показан принцип получения ВКК при прохождении флокул через немагнитные сетки, разрушающие их структуру. Его можно назвать условно триггерным, так как сетка работает подобно управляющей сетке триода, пропуская магнетит и богатые сродки и задерживая бедные сродки. При этом нарушается принцип потокосцепления, обуславливающий высокую прочность флокул, они «рассыпаются», а пондеромоторная магнитная сила, действует более селективно, чем сила потокосцепления и способна протянуть сквозь сетку только магнетитовые зерна и богатые сродки.

Можно видеть, как рассеянные зерна пустой породы и бедные сродки тут же оседают в приемники для хвостов или промпродуктов.

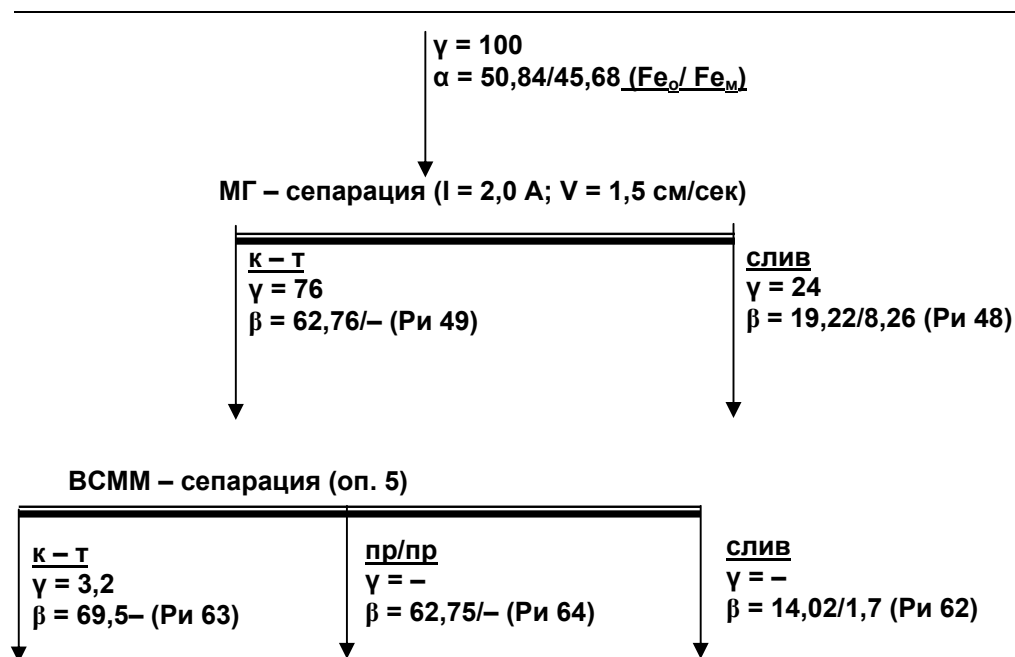


Рис. 5. Испытания модели с ВСММС отдельно и совместно с магнито-гравитационным сепаратором (МГС) (показатели в %)

Дальнейшие технологические исследования различных конструкций на данном этапе проводятся для выявления оптимального варианта, который может быть положен в основу технического задания на проектирование опытно-промышленного образца.

Эти модели были изготовлены в НТЦ МГГУ «Горнобогатительные модульные установки» и испытаны в ОТК ОАО «Лебединский ГОК», результаты испытаний были положены в основу технического задания на проектирование опытно-промышленного образца такого сепаратора (табл. 2).

В табл. 3 и табл. 4 приводятся результаты этих испытаний на продуктах ОАО ЛГОК, хотя они еще не завершены, кроме этих продуктов проводятся также испытания аналогичных продуктов ОАО Михайловский ГОК с целью получения высококачественных концентратов. Также приведены данные

анализов, полученных при испытаниях при высокоселективного мокрого магнитного сепаратора.

Опытно-промышленные образцы высокоселективного мокрого магнитного сепаратора планируется изготовить и испытать на комбинатах до конца 2005 г.

В работах многих исследователей отмечается, что сухая магнитная сепарация в три приема позволяет получить такое качество концентрата, которое мокрая магнитная сепарация может обеспечить не менее чем за семь приемов. Более того, сухая центробежная сепарация в бегущем магнитном поле при оптимальных параметрах режима позволяет получать супер-концентраты, содержащие до 71,5 % Fe [3]. Однако, во всем мире считают, что мокрая магнитная сепарация способна только на стадийное выделение отвальных продуктов (хвостов), но не концентрата

[11]. Тем не менее, наши исследования подтвердили эту возможность и для мокрой магнитной сепарации.

В заключение можно сделать главный о том, что при соответствующем управлении процессами магнитной флокуляции в технологических про-

цессах и аппаратах современных железорудных горнообогатительных комбинатов возможно стадийное выделение конечного концентрата только на основе основного процесса – мокрого магнитного обогащения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных. Том I, М.: Издательство МГГУ. 2005.
2. Остапенко П.Е. Обогащение железных руд. М., Недра, 1985.
3. Плаксин И.Н., Кармазин В.И., Олофинский Н.Ф., Норкин В.В., Кармазин В.В. Новые направления глубокого обогащения тонковкрапленных железных руд. – М.: Наука, 1964.
4. Кармазин В.В. Современные тенденции в использовании минерального сырья. Сб. «Устойчивое развитие горнодобывающей промышленности», Кривой Рог, КГТУ, 2004.
5. Крючков А.В. Совершенствование технологии обогащения железистых кварцитов // Горный журнал. - 2001. - № 6. - С. 49-52.
6. Лицинский В.С., Попов В.П., Остапенко А.В. Основные направления подготовки к производству концентрата для металлизированных брикетов // Горный журнал. - 1997. - №5-6. - С. 57-60.
7. Сухорученков А.И., Стаханов В.В, Зайцев Г.В. Тонкое грохочение – высоко-эффективный метод повышения технико-экономических показателей обогащения тонковкрапленных магнетитовых руд // Горный журнал. - 2001. - № 4. - С. 48-50.
8. Ключин В.А., Остапенко А.В. Совершенствование технологии обогащения // Горный журнал. - 1996. - № 3. - С. 27-32.
9. Анализ движения готового класса в технологических схемах магнитного обогащения железных руд/ А.А. Щаденко, В.П.Надутый и др. // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. - Днепропетровск: Институт геотехнической механики НАН Украины.- 2001. - Вып.29.-С.182-186.
10. Усачев П.А., Опалев А.С. Магнитно-гравитационное обогащение руд. РАН, Кольский НЦ, Горный институт, Апатиты, 1993.
11. Ширяев А.А., Малый Б.М., Присада Г.В. и др. Технология обогащения магнетитовых руд подземной добычи Желгореченского месторождения со стадийным выделением концентрата. Обогащение руд. - 2002. - №4, - С. 9-11.
12. Техника и технология обогащения железных руд на зарубежных обогатительных фабриках: Отчет о НИР/Институт технико-экономических исследований Министерства черной металлургии СССР -ИТЭИ Минчермет/; Руководитель Л.А. Дринько. № ГР70054136; Инв. № А6117. - М., 1984. - С. 119.

### Коротко об авторах

Кармазин В.В. – профессор, доктор технических наук,  
Жилин С.Н. Измалков В.А., Опалев А.С. – кандидаты технических наук,  
Кретов С.И., Ковалев. Р.В.– аспиранты,  
Московский государственный горный университет.

