

Код МРНТИ 52.45.21

\*А. Доберсек, А. Кирнарский

«Инжиниринг Доберсек ГмбХ» (г. Менхенгладбах, ФРГ)

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

**Аннотация.** Произведена оценка технологического совершенства технологии обогащения магнетитовой руды на основании прямого замера эффективности классификации, мокрой магнитной сепарации, дещлакации и флотации. Эффективность классификации колеблется в пределах 38 ... 55%, магнитной сепарации – 9 ... 52%, магнитной дещлакации – 32 ... 37%. Селективность процесса ММС находится на уровне 2,62, а обратной флотации – 2,27 ... 4,80. Такой уровень эффективности и селективности сепарационных процессов недостаточно высок для достижения высоких качественно-количественных показателей и требует технологических инноваций для улучшения совершенства существующих технологий и оборудования при переработке железных руд.

**Ключевые слова:** обогащение руды, железная руда, классификация, переработка, концентрат железорудный, грохот, рудоподготовка.

### Темір кенін байыту үдерістерінің технологиялық кемелдігі

**Андатпа.** Магнетит кенін байыту технологиясының технологиялық кемелділігі классификацияның, дымқыл магниттік сепарацияның, дещлаацияның және флотацияның тиімділігін тікелей өлшеу негізінде бағаланды. Классификацияның тиімділігі 38 ... 55% аралығында, магниттік сепарацияның тиімділігі 9 ... 52%, магниттік дещлаацияның тиімділігі 32 ... 37% аралығында өзгеріп отырады. ММС процесінің селективтілігі 2,62 деңгейінде, ал кері флотацияның селективтілігі 2,27 ... 4,80 аралығында. Сепарациялық процестердің мұндай тиімділік және селективтілік деңгейі сапалық және сандық көрсеткіштерге жету үшін жеткіліксіз және темір кендерін қайта өңдеу кезінде қолданыстағы технологиялар мен жабдықтардың жетілдірілуін қажет етеді.

**Түйінді сөздер:** кенді байыту, темір кен кені, сыныптама, қатты қалдықтарды, темір кен қойыртыпасы, таселек, кенөзірлек.

### Technological excellence of iron ore beneficiation processes

**Abstract.** The technological excellence of the magnetite ore beneficiation technology has been evaluated based on the direct measurement of the efficiency of classification, wet magnetic separation, desliming, and flotation. The classification efficiency ranges from 38% to 55%, magnetic separation from 9% to 52%, and magnetic desliming from 32% to 37%. The selectivity of the WMS process is at the level of 2.62, and reverse flotation at 2.27 to 4.80. This level of efficiency and selectivity of the separation processes is not sufficiently high to achieve high-quality and quantitative indicators and requires technological innovations to improve the perfection of existing technologies and equipment for iron ore processing.

**Key words:** ore dressing, iron ore, classification, recycling, iron-ore concentrate, sifter.

### Критерии технологического совершенства процессов обогащения

Обогащение железной руды традиционно включает процессы магнитной сепарации, классификации, дещлакации, флотации, измельчения. Для оценки технологического совершенства применяемой технологии обогащения железной руды провели генеральное опробование технологических секций обогатительных фабрик железорудных горно-обогатительных комбинатов, рассчитали фактические качественно-количественные показатели и на их основе определили эффективность сепарационных процессов.

Эффективность классификации определяется по формуле:

$$E = [(a - \theta) \cdot (\beta - a) / ((1 - a) \cdot a \cdot (\beta - \theta))] \cdot 100, \% \quad (1)$$

где  $a$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  – содержание расчетного класса соответственно в питании, сливе и песках классификатора, д.е.

Эффективность магнитного разделения – это приращение массы железа общего в концентрате при реальном обогащении к приращению массы концентрата при теоретически достижимом обогащении, когда в концентрат извлекается все железо. Эффективность мокрой магнитной сепарации  $\eta$  определяется по формуле:

$$\eta = [(\varepsilon - \gamma) \cdot (100 - \alpha_{\text{мин}})] \cdot 100, \% \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – извлечение железа в концентрат;

$\gamma$  – выход концентрата;

$\alpha_{\text{мин}}$  – содержание в руде минерала в питании сепаратора, %.

При обогащении магнетитовой руды  $\alpha_{\text{мин}}$  принимается равным  $(\alpha_{72,4}) \cdot 100, \%$ , где  $\alpha$  – содержание железа общего в питании, %; 72,4 – содержание железа в магнетите, %.

Эффективность гравитационного и флотационного обогащения определяется по формуле [1]:

$$\eta = [(\varepsilon - \gamma) / (100 - \alpha)] \cdot 100, \% \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – извлечение железа общего в концентрат;

$\gamma$  – выход концентрата;

$\alpha$  – содержание в исходном продукте железа общего, %.

Общая эффективность применяемой технологии обогащения ( $\eta_0$ ) определяется как произведение частных значений эффективности последовательных технологических процессов.

Эффективность классификации, магнитного и гравитационного разделения может определяться также по кривой распределения Тромпа как среднее вероятное отклонение ( $E_{pm}$ ) и погрешность разделения (I), но для этого необходимо произвести плотностной анализ в тяжелых жидкостях (бромформ  $CHBr_3$ , жидкость Клеричи – раствор солей таллия).

Коэффициент селективности магнитного обогащения определяется как отношение магнитных восприимчивостей разделяемых частиц  $\chi_a/\chi_b$  более магнитных  $\chi_a$  и менее магнитных  $\chi_b$ . Так как удельная магнитная восприимчивость не зависит от напряженности поля и формы зерен, то среднее значение  $\chi_{cp}$  вычисляется как средневзвешенная величина с учетом содержания сростков в данном продукте.

Коэффициент селективности флотации магнетитового концентрата определяется по формулам А.М. Годэна [2] и С.И. Митрофанова [3] соответственно:

$$K_{SG} = \sqrt{[(E_1(1-E_2))/(E_2(1-E_1))]} \quad (4.1)$$

$$K_{SM} = \lg[1/(1-E_1)] / \lg[1/(1-E_2)] \quad (4.2),$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – извлечение магнетита и кремния в камерный продукт соответственно.

Энергоэффективность технологического процесса и технологии в целом определяется удельным расходом электроэнергии на 1 т исходной руды и/или концентрата

(кВт·час/т). Чем эффективнее процесс технологически, тем меньше его энергоемкость и выше рентабельность предприятия в целом.

#### 1. Эффективность классификации

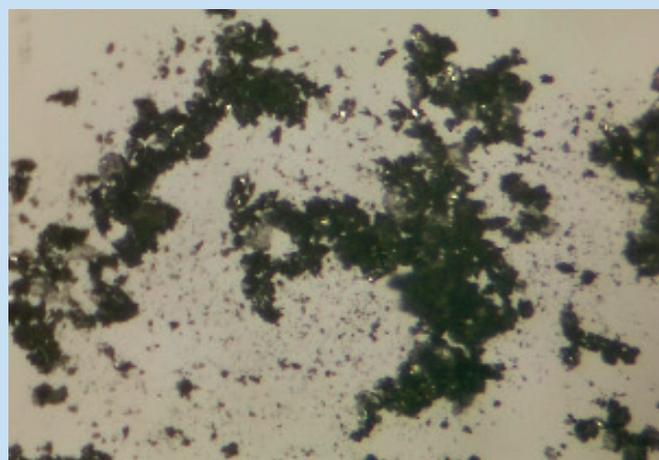
Технологическое совершенство технологии обогащения железной руды оценивалось постадиально по каждому переделу. Результаты классификации в спиральных классификаторах на первой стадии и в гидроциклонах на последующих стадиях измельчения в замкнутом цикле с шаровыми мельницами сведены в таблицу 1. Эффективность классификации определялась по формуле 1.

Данные таблицы 1 свидетельствуют о низком извлечении готового класса в сливной продукт и значительном его извлечении в пески классификации. Так, на третьей стадии измельчения – классификации в условиях СевГОКа на ОФ – 1 по первой очереди на секции № 3–4 содержание класса менее 56 мкм достигает 72%, а по второй очереди на секции № 24 – 75%. Чем ниже эффективность классификации, тем выше циркуляционная нагрузка, переизмельчение раскрытых рудных зерен, ошлавование, расход энергии, шаров и футеровки. Кроме того, из-за проявления двух разделительных признаков [6], по крупности и плотности, в песках происходит накопление промежуточного магнетитового концентрата – циркуляционная концентрация, что подтверждается превышением содержания железа общего в песках против его содержания в сливе: на первой стадии – 41,00% против 32,60%, на второй стадии – 60,43% против 50,20%, а на третьей – 65,49% против 61,2% (по данным опробования ЦГОКа), при этом отношение содержания железа в песках и сливе постадиально составляет соответственно 1,25–1,20–1,07 при стадиальной эффективности классификации 47,5–44,7–55,02% и циркуляционной нагрузке 127–256–97%. Характерно, что доводка магнетитового концентрата в условиях ЦГОКа на технологической секции № 18 в гидроциклонах малого диаметра 350 мм при эффективности классификации 46,41% и циркуляционной нагрузке 95% привела к реверсу циркуляционной концентрации: содержание железа в песках стало меньше, чем в сливе гидроциклонов. При тонкой классификации на грохотах Derrick в подрешетном продукте – 0,074 мм содержание железа общего 70%, а в надрешетном продукте – 63,47% и питания – 68,24%. Извлечение железа общего в подрешетный продукт составляет 74,93%, а выход этого продукта – 73,05%. Если этот процесс оценивать эффективностью

классификации по формуле 1, то она достаточно высокая – 62,92%, а если исходить из оценки этого передела как гравитационного процесса, то его эффективность (формуле 2) довольно низкая – 5,93%. В гидроциклонах малого диаметра 350 мм эта эффективность выше и составляет 6,30%.

#### 2. Эффективность и селективность магнитной сепарации и дешламации

Эффективность предыдущей технологической операции предопределяет эффективность последующего процесса мокрой магнитной сепарации. Переизмельчение раскрытых зерен магнетита и богатых сростков, как следствие низкой эффективности классификации, приводит к уменьшению удельной магнитной восприимчивости тонких частиц и увеличению их магнитной жесткости, особенно это заметно при крупности менее 30 мкм. Магнитные флокулы захватывают частицы кремния и силикатов, что ухудшает качество магнитных продуктов на заключительных операциях ММС (рис. 1).



**Рис. 1. Магнитные флокулы класса 0,03–0,045 мм (слив гидроциклонов III стадии).  
Сурет 1. 0,03–0,045 мм класты магнитті флокулдар (III кезеңдегі гидроциклондардың төгіндісі).  
Figure 1. Magnetic flocs of 0.03–0.045 mm class (overflow from the hydrocyclones of the III stage).**

Результаты мокрой магнитной сепарации представлены в таблице 2. Эффективность магнитной сепарации вычислялась по формуле 2.

Таблица 1

Кесте 1

Table 1

#### Результаты классификации

#### Классификация нәтижелері

#### Classification results

Стадия классификации	Эффективность разделения по граничному зерну – 56 мкм, %				
	СевГОК: секции РОФ – I		Ингулецкий ГОК: секции		ЦГОК
	№ 3–4	№ 24	№ 6 РОФ 1	№ 20 РОФ 2	секция № 8–9
Первая стадия	50,84	51,08	42,50	32,02	47,50
Вторая стадия	45,65	49,63	52,97	37,99	44,70
Третья стадия	53,23	43,65	38,45		55,02

Таблица 2

## Результаты мокрой магнитной сепарации

Кесте 2

## Дымқыл магниттік сепарация нәтижелері

Table 2

## Results of wet magnetic separation

Стадия магнитной сепарации	Эффективность магнитной сепарации, %				
	СевГОК: секции		Ингулецкий ГОК: секции		ЦГОК
	№ 3–4	№ 24	№ 6 РОФ 1	№ 20 РОФ 2	секция № 8–9
Первая стадия	51,84	51,97	43,30	36,88	49,66
Вторая стадия	14,32	10,77	15,22	16,23	8,77
Третья стадия	17,53	21,11	21,45	27,63	37,48
Четвертая стадия	14,16	15,02	9,98		26,08
Пятая стадия			16,56		

Данные таблицы 2 свидетельствуют о низкой эффективности мокрой магнитной сепарации, особенно на заключительных переделах ММС, когда требуется значительная степень концентрации для получения высококачественного магнитного продукта. Так, на четвертой стадии ММС эффективность разделения не превышает 26,08 % в условиях секции № 8–9 ЦГОКа, в то время как на СевГОКе она составляет 14–15%, а на секции № 6 РОФ – 1 ИнГОКа находится на минимальном уровне – 9,98%. Максимальная эффективность ММС достигается на первой стадии ММС, но не более 52%, а минимальная на второй стадии, на уровне 8,77%. Степень концентрации на железорудных предприятиях обычно исчисляется по приросту железа общего в концентрате ММС и составляет для первой стадии в два приема ММС – 12,7 ... 15,8%, для третьей стадии в два приема – 1,65 ... 5,43%, а для ММС – IV на уровне 0,9 ... 2,45%. После второго приема ММС – IV получаем

магнитный продукт, который в диапазоне крупности -56 + 30 мкм представляет собой высококачественный концентрат с содержанием железа общего более 70% (таблица 3).

Проблема состоит в том, как выделить продуктивную фракцию, верхний предел крупности которой равен 56 мкм, а нижний – 30 мкм? На ЦГОКе пошли по пути классификации по граничному зерну, соответствующему заданному диапазону крупности, используя для этого вибрационные грохоты Derrick и ГЦУ.

Магнитное обесшламливание по своей технологической значимости не уступает ММС. В условиях ЦГОКа магнитное обесшламливание выполнено на каждой стадии в два приема, при этом прирост железа общего на дешламации – I составляет 5,57% при эффективности магнитного разделения 31,64%, а прирост железа общего на дешламации – II составляет 4,00% при эффективности магнитного разделения – 37,29%.

Таблица 3

## Магнитный продукт ММС – IV – II

Кесте 3

## ММС – IV – II магниттік өнімі

Table 3

## Magnetic Product of WMS – IV – II

Класс крупности, мм	Выход, %	Масс. доля Fe общ	Степень раскрытия рудных минералов, %	Сротки с содержанием магнетита						Сумма раскрытых зерен
				Рудные 95-100	Богатые 75-95	Средние 25-75	Бедные 5-25	Нерудные 0-5	Сумма	
-0,315 + 0,16	0,59	17,4	15,68	10,13	1,7	19,5	14,2	54,47	100	64,6
-0,16+0,071	4,89	19,3	14,41	8,3	5,6	18	18,8	49,3	100	57,6
-0,071+0,056	1,96	43,7	69,52	49,36	5,3	10,7	13	21,64	100	71
<b>-0,056 + 0,045</b>	<b>11,15</b>	<b>69,7</b>	<b>99,65</b>	<b>89,19</b>	<b>2,9</b>	<b>3,1</b>	<b>4,5</b>	<b>0,31</b>	<b>100</b>	<b>89,5</b>
<b>-0,045+0,03</b>	<b>77,69</b>	<b>71,4</b>	<b>99,89</b>	<b>96,49</b>	<b>1</b>	<b>0,9</b>	<b>1,5</b>	<b>0,11</b>	<b>100</b>	<b>96,6</b>
-0,03+0,02	1,24	16,4	14,81	9,72	1,5	17,8	15,1	55,88	100	65,6
-0,02+0,01	1,24	18,2	15,61	10,63	5,8	15,6	10,5	57,47	100	68,1
-0,01+0	1,24	4,3	1,1	0,92	0,8	6,3	6,6	85,38	100	86,3
Итого	100	65,63	93,78	86,6	1,59	2,75	3,32	5,74	100	92,34

Коэффициент селективности магнитного обогащения определялся как отношение магнитной восприимчивости разделяемых частиц: более магнитных  $\chi_a$  и менее магнитных  $\chi_b$  [4]. Так как удельная магнитная восприимчивость не зависит от напряженности поля и формы зерен, то среднее значение  $\chi_{cp}$  вычислялось как средневзвешенная величина с учетом содержания сростков в данном продукте. Данные расчета приведены в таблице 4.

Данные таблицы 4 свидетельствуют о том, что успешное разделение имеет место в случае рудных и бедных зерен, для которых соотношение  $\chi_a/\chi_b$  на уровне 16, а также рудных и нерудных зерен, для которых коэффициент селективности равен 400. Что касается богатых и средних сростков, то для них коэффициент селективности менее 3. Средний коэффициент селективности составляет 2,62. Практика магнитного обогащения на современных магнитных сепараторах показывает, что коэффициент селективности должен быть не менее 3. Наиболее высокое качество имеет класс 0,03–0,045 мм, содержание железа общего в котором достигает 68,40%, степень раскрытия рудных зерен которого – 83,50%, при этом содержание богатых, средних, бедных, нерудных сростков в нем составляет соответственно 8,9%, 7,7%, 8,4 % и 3,7%. Средняя удельная магнитная восприимчивость для этого класса по расчету  $\chi_{cp} = 2,276 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг, а средний коэффициент селективности несколько выше и составляет 2,19. При прочих равных условиях, чем больше удельная магнитная восприимчивость, тем с большей силой магнитное поле воздействует на минеральное зерно и наоборот. Как следствие, чем меньше значение коэффициента селективности, тем труднее улучшить качество продукта за счет магнитной сепарации. В магнитном поле рабочего сепаратора неоднородном как по напряженности, так и величине магнитной силы при незначительном различии удельной магнитной восприимчивости  $\chi_a$  и  $\chi_b$  разделяемых частиц может оказаться, что магнитная сила  $F_{m1}$  более магнитного зерна, удаленного от полюса, окажется меньше магнитной силы  $F_{m2}$  менее магнитного зерна, находящегося у полюса, результатом чего есть ухудшение качества продуктов разделения из-за их взаимного засорения.

### 3. Эффективность и селективность флотации магнетитовых концентратов

Баланс продуктов флотационного обогащения по четырем флотационным машинам приведен в таблице 5. Расчет эффективности флотационного обогащения произведен по формуле 3.

Из таблицы 5 видно, что первые две флотомашины работают малоэффективно и требуют наладки реагентного режима, в то время как третья и, особенно четвертая флотомашинка показывают эффективность, которая не уступает магнитной сепарации и магнитной дешламации.

Для повышения качества продуктов флотации необходимо повысить селективность извлечения, для чего рассчитаем коэффициент селективности по формулам 4.1 и 4.2. Результаты расчета коэффициента селективности сведены в таблицу 6. Флотомашинки обеспечивают относительно высокое извлечение магнетита в камерный продукт: 82% в камере ФМ – 3 и 86,85% – в камере ФМ – 4, что лучше по сравнению с работой машин ФМ – 1 и ФМ – 2, но в последнем случае меньше засорение кремнеземом, что является важным показателем при доводке магнетитовых концентратов до получения высококачественного концентрата для процесса прямого восстановления железа (DRI) с содержанием кремнезема ( $SiO_2$ ) менее 3%.

Данные таблицы 6 свидетельствуют о низкой селективности обратной флотации магнетитовой руды. Для получения высококачественного флотационного концентрата не только по содержанию железа общего, но и по содержанию кремнезема и силикатов необходимо повысить коэффициент селективности на порядок.

Реализация технологических инноваций требует применения современного оборудования, которое обеспечивает повышение производительности, эффективности и селективности сепарационных процессов. При рудоподготовке целесообразно применять роллер-прессы [5], на стадии обогащения перспективны гидроциклоны последнего поколения типа 350CVX, струйные флотомашинки типа IMHOFFLOTCELL, трехпродуктовые магнитные сепарационные комплексы, винтовые сепараторы, а сгу-

Таблица 4

*Результаты расчета коэффициента селективности ММС – I*

Кесте 4

*ММС – I селективтілік коэффициентінің есептеу нәтижелері*

Table 4

*Calculation results of the selectivity coefficient for WMS – I*

Тип сростков	рудные	богатые	средние	бедные	нерудные
Содержание магнетита, %	100	95	75	25	5
Выход по массе, %	42,60	7,00	24,80	14,40	11,10
Удельная магнитная восприимчивость, м <sup>3</sup> /кг	$4,98 \cdot 10^{-4}$	$4,49 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$1,24 \cdot 10^{-6}$
Средняя удельная магнитная восприимчивость, $\chi_{cp}$ , м <sup>3</sup> /кг	$1,8992 \cdot 10^{-4}$				
Коэффициент селективности		1,11	1,78	16	400
Средний коэффициент селективности	2,62				

Таблица 5

Баланс продуктов флотационного обогащения железной руды

Кесте 5

Темір кенін флотациялық байытудың өнімдерінің балансы

Table 5

Balance of products of iron ore flotation beneficiation

Продукты флотации	Показатели флотации			
	Выход, %	Fe – содержание, %	Извлечение, %	Эффективность, %
Флотационная машина № 1				
Исходный продукт флотации	100,00	53,10	100,00	
Флотационный концентрат	60,27	66,50	75,50	19,19
Флотационные хвосты	39,73	32,80	24,50	
Флотационная машина № 2				
Исходный продукт флотации	100,00	53,10	100,00	
Флотационный концентрат	60,37	66,30	75,40	19,40
Флотационные хвосты	39,63	33,00	24,60	
Флотационная машина № 3				
Исходный продукт флотации	100,00	60,10	100,00	
Флотационный концентрат	76,49	66,20	84,30	45,36
Флотационные хвосты	23,51	40,20	15,70	
Флотационная машина № 4				
Исходный продукт флотации	100,00	60,10	100,00	
Флотационный концентрат	80,47	66,60	89,20	56,64
Флотационные хвосты	19,53	33,30	10,80	

Таблица 6

Результаты расчета селективности флотации железной руды

Кесте 6

Темір кенін флотациялау селективтілігі коэффициентінің есептеу нәтижелері

Table 6

Calculation results of the selectivity coefficient for iron ore flotation

Номер флотомашины	Извлечение в камерный продукт E, %		Коэффициент селективности K <sub>s</sub>	
	магнетита E <sub>1</sub>	кварца E <sub>2</sub>	по Митрофанову	по Годену
Флотационная машина № 1	69,32	29,54	2,32	3,38
Флотационная машина № 2	72,51	23,59	2,92	4,80
Флотационная машина № 3	82,00	47,03	2,27	2,70
Флотационная машина № 4	86,85	46,76	2,74	3,22

щение хвостовой пульпы предпочтительнее проводить в высокоскоростных сгустителях с промежуточными зумпфами.

#### 4. Общая эффективность технологии обогащения

Совершенство применяемой технологии обогащения определяется общей эффективностью сепарационных процессов, при этом эффективность предыдущей технологической операции предопределяет эффективность последующего технологического процесса. Общая эффективность ( $\eta_o$ ) применяемой технологии обогащения на ИнГОКе определяется по формуле

$$\eta_o = [\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3] \cdot 100, \% \quad (5)$$

где  $\eta_1$  – эффективность классификации, д.е.;

$\eta_2$  – эффективность магнитной сепарации, д.е.;

$\eta_3$  – эффективность флотации, д.е.

Подставляя достигнутые значения на каждом технологическом переделе, получаем значение общей эффективности технологии в целом. Принимая максимально достигнутые частные значения эффективности классификации, ММС и флотации соответственно  $\eta_1 = 0,55$  д.е.;  $\eta_2 = 0,4333$  д.е.;  $\eta_3 = 0,5664$  д.е., получаем максимально достигнутый уровень эффективности применяемой технологии, который в конкретном случае равен 13,50%.

Для повышения общего показателя эффективности обогащения необходимо создать условия для максимального

проявления каждого сепарационного процесса в отдельности, при этом предпочтительнее «короткие» технологические цепи, так как увеличение количества одноименных разделительных переделов, например, ММС, влечет за собой увеличение потерь из-за переходных режимов на стыке двух процессов и/или действия нескольких разделительных признаков в рамках одного сепарационного процесса [6]. Целесообразно применять разноименные технологические процессы в определенной последовательности: классификация по крупности, разделение по плотности одинаковых или близких по крупности минеральных частиц, разделение по магнитной восприимчивости одинаковых или близких по плотности фракций, разделение по смачиваемости технологически «изомерных» продуктов.

Особую значимость приобретают вспомогательные процессы. Измельчение не относится к сепарационным процессам, но эффективность магнитной сепарации, гравитации и флотации во многом зависит от степени раскрытия минеральных зерен и их переизмельчения, уровня ошламования системы, селективности этого технологического передела. Другой пример – это использование механической активации, которая является подготовительной операцией, но ее действие значительно повышает реакционную способность минеральной поверхности. Предварительное размагничивание продуктов ММС улучшает процесс классификации частиц за счет разрушения магнитных флокул.

Правильная организация водно-шламового хозяйства обеспечивает необходимое качество разделительной среды, регенерация которой играет ключевую роль для реализации сепарационных процессов, так как реологические свойства, содержание твердого и шламов, флокулянтов и реагентов в пульпе являются регуляторами технологических процессов.

#### 5. Энергоэффективность технологии обогащения

Энергоэффективность складывается из энергоэффективности рудоподготовки, собственно обогащения и вспомогательных процессов (сгущение, фильтрование). На стадии рудоподготовки перспективным является максимально возможное снижение крупности дробленого продукта перед измельчением с переводом рудного тела в метастабильное состояние с образованием микротрещин, что облегчает его разрушение в шаровых мельницах и сокращает энергозатраты. Другое направление повышения энергоэффективности – сгущение хвостов обогащения до содержания твердого 50%.

Энергоэффективность технологического процесса и технологии в целом уместно рассчитать при внедрении инновационного оборудования. Так применение на стадии рудоподготовки современного оборудования, а именно, дробилок крупного дробления, вибрационных грохотов предварительного грохочения позволяет получить удель-

ный расход электроэнергии токоприемников дробильного отделения железорудного ГОКа по новой технологии на 1 т перерабатываемой руды 1,42 кВт·час/т, а на 1 т товарного концентрата – 3,12 кВт·час/т. Внедрение роллер-прессов, вертикальных бисерных мельниц на стадии ультратонкого измельчения, автоматизированных гидроциклонных установок изменяет традиционную схему обогащения магнетитовой железной руды, что обеспечивает повышение энергоэффективности технологии в целом: установленная мощность оборудования по новой технологии по сравнению с действующим производством сокращается по первой очереди для условий СевГОКа на 12,62 мВт, по второй очереди 20,84 мВт и по дробильному переделу на 5,06 мВт. Итого снижение установленной мощности после перехода на новую технологию составляет 29%. Потребляемая мощность после перехода на новую технологию сокращается. Удельный расход электроэнергии после внедрения инновационного оборудования снижается и составляет 13,37 кВт·час/т рядовой руды, а на 1 т концентрата 31,79 кВт·час/т концентрата.

Реализация проекта сгущения хвостовой пульпы на ЮГОКЕ позволила организовать внутризаводской оборот, при котором в 10 раз сокращается объем шламов, складываемых в хвостохранилище, а энергоэффективность этого технологического процесса оценивается по снижению потребления электроэнергии, которое уменьшилось на 40% [7].

#### Выводы

1. Технологическое совершенство применяемой технологии обогащения железной руды определяется эффективностью и селективностью отдельных процессов: классификации, мокрой магнитной сепарации, магнитной дешламации и флотации, сгущения.

2. Эффективность классификации колеблется в пределах 38 ... 55%, магнитной сепарации – 9 ... 52%, магнитной дешламации – 32 ... 37%. Селективность процесса ММС находится на уровне 2,62, а обратной флотации – 2,27 ... 4,80.

3. Эффективность технологического процесса зависит в значительной степени от подготовительных операций: измельчения, механической активации, размагничивания магнитных продуктов ММС.

4. Повышение технологической эффективности применяемых процессов сокращает энергоемкость производства и увеличивает энергоэффективность технологии обогащения в целом.

5. Существующий уровень эффективности и селективности сепарационных процессов недостаточно высокий для улучшения качественно-количественных показателей и требует внедрения технологических инноваций в традиционных схемах обогащения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фоури П. Моделирование схем разделения с использованием численного анализа // 6-я Международная конференция по тяжелым минералам, 2007. С. 75–82 (на английском языке)
2. Гаудин А. Принципы обогащения полезных ископаемых: McGraw – Hill, 1939. 554 с. (на английском языке)

3. Митрофанов С.И. Селективная флотация: М.: Недра, 1967. С. 156–158 (на русском языке)
4. Кармазин В.И. Обогащение руд черных металлов: М.: Недра, 1982. 215 с. (на русском языке)
5. Шонерт К. Обзор измельчения с использованием валковых мельниц высокого давления // Международный журнал переработки полезных ископаемых. 1988. № 22. С. 401–412 (на английском языке)
6. Пилов П.И., Кирнарский А.С. Технологическая однопараметричность как инструмент повышения селективности сепарационных процессов // Обогащение руд. 2020. № 2. С. 38–43 (на русском языке)
7. Доберсек А., Кирнарский А., Райш А. Сгущение хвостовой пульпы на Южном горно-обогатительном комбинате // Горный журнал Казахстана. 2023. № 4. С. 42–47 (на русском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Фоури П. Сандық талдауды қолдана отырып, бөлу схемаларын модельдеу // Ауыр минералдар бойынша 6-шы халықаралық конференция, 2007. Б. 75–82 (ағылшын тілінде)
2. Гаудин А. Пайдалы қазбаларды байыту принциптері: McGraw-Hill, 1939. 554 б. (ағылшын тілінде)
3. Митрофанов С.И. Селективті флотация: М.: Жер қойнауы, 1967. Б. 156–158 (орыс тілінде)
4. Кармазин В.И. Қара металл кендерін байыту: М.: Жер Қойнауы, 1982. 215 б. (орыс тілінде)
5. Шонерт К. Жоғары қысымды роликті диірмендерді қолдана отырып ұнтақтауға шолу // Халықаралық пайдалы қазбаларды өңдеу журналы. 1988. № 22. Б. 401–412 (ағылшын тілінде)
6. Пилов П.И., Кирнарский А.С. Технологиялық бір параметрлілік бөлу процесстерінің селективтілігін арттыру құралы ретінде // Кендерді байыту. 2020. № 2. Б. 38–43 (орыс тілінде)
7. Доберсек А., Кирнарский А., Райш А. Оңтүстік тау-кен байыту комбинатында құйрық целлюлозасын қоюлату // Қазақстанның кен журналы. 2023. № 4. Б. 42–47 (орыс тілінде)

#### REFERENCES

1. Fourie P.J. Modelling of separation circuits using numerical analysis // The 6th International Heavy Minerals Conference, 2007. P. 75–82 (in English)
2. Gaudin A.M. Principles of Mineral Dressing: McGraw – Hill Book Company, 1939. 554 p. (in English)
3. Mitrofanov S.I. Selektivnaya flotatsiya [Selective Flotation]: Moscow: Nedra, 1967. 156–158 pp. (in Russian)
4. Karmazin V.I. Obogashchenie rud chernykh metallov [Beneficiation of Ferrous Metal Ores]: Moscow: Nedra, 1982. 215 pp. (in Russian)
5. Schönert K. A survey of grinding with high – compression roller mills // International Journal Mineral Processing. 1988. No. 22. 401–412 pp. (in English)
6. Pilov P.I., Kirnarsky A.S. Tekhnologicheskaya odnoparametrichnost' kak instrument povysheniya selektivnosti separatsionnykh protsessov [Technological Uniparametricity as a Tool for Increasing the Selectivity of Separation Processes], Obogashchenie rud [Mineral Processing]. 2020. No. 2. 38–43 pp. (in Russian)
7. Dobersek A., Kirnarsky A., Raish A. Sgushchenie khvostovoi pul'py na Yuzhnom gorno-obogatitel'nom kombinatе [Thickening of Tailings Slurry at the Southern Mining and Processing Plant], Gornyi zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. 2023. No. 4. 42–47 pp. (in Russian)

#### Сведения об авторах:

**Доберсек А.**, к.т.н., Президент компании «ENGINEERING DOBERSEK GmbH», Компания «ENGINEERING DOBERSEK GmbH» (г. Менхенгладбах, ФРГ)

**Кирнарский А.С.**, д.т.н., Научный руководитель проектов по обогащению полезных ископаемых, Компания «ENGINEERING DOBERSEK GmbH» (г. Менхенгладбах, ФРГ), [anatoliy.kirnarsky@ed-mg.de](mailto:anatoliy.kirnarsky@ed-mg.de)

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Доберсек А.**, Ph.D, ENGINEERING DOBERSEK GmbH, ENGINEERING DOBERSEK GmbH президенті (Менхенгладбах қ., Германия)

**Кирнарский А.С.**, т.ғ.д., ENGINEERING DOBERSEK GmbH, Минералды қайта өңдеу жобаларының ғылыми жетекшісі (Менхенгладбах қ., Германия)

#### Information about the authors:

**Dobersek A.**, Ph.D, President of ENGINEERING DOBERSEK GmbH, ENGINEERING DOBERSEK GmbH (Mönchengladbach, Germany)

**Kirnarsky A.S.**, Doctor of Technical Sciences, Scientific Director of Mineral Processing Projects, ENGINEERING DOBERSEK GmbH (Mönchengladbach, Germany)