

Код МРНТИ 52.01.83:52.45.32

*А. Доберсек, А. Кирнарский

«ENGINEERING DOBERSEK GmbH» (г. Менхенгладбах, Германия)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОДНОФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ В ПРОЦЕССАХ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Аннотация. Цель исследования – теоретическое обоснование принципа однофункциональности на примере гравитационного разделения минерального сырья по двум разделительным признакам и промышленное подтверждение его состоятельности при обогащении руд цветных и черных металлов, золота, угля, нерудного минерального сырья с рекомендациями по улучшению технологического режима. Результатом исследований явилось разработка технологических решений, где созданы условия для максимального проявления каждого сепарационного процесса в отдельности. Наиболее эффективный технологический процесс – тяжелосредное обогащение, который работает по одному разделительному признаку – плотности частиц. При обогащении каменного угля средневероятное отклонение E_{pm} достигает 24–30 кг/м³, а при обогащении оловянной руды $E_{pm} = 30–60$ кг/м³, что на порядок выше по сравнению с гидравлической отсадкой, концентрацией на столах и винтовых сепараторах.

Ключевые слова: минеральное сырье, обогащение, эффективность, селективность, однофункциональность, тяжелосредное обогащение.

Минералдық ресурстарды байыту процестеріндегі технологиялық бір функциялықтың теориясы мен практикасы

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты-минералды шикізатты екі бөлу белгісі бойынша гравитациялық бөлу мысалында бір функционалдылық принципін теориялық негіздеу және технологиялық режимді жақсарту бойынша ұсыныстармен түсті және Қара металдар, алтын, көмір, кенді емес минералды шикізат кендерін байыту кезінде оның өміршеңдігін өнеркәсіптік растау. Зерттеудің нәтижесі технологиялық шешімдерді әзірлеу болды, онда әрбір бөлу процесінің жеке көрінісін барынша арттыру үшін жағдайлар жасалған. Ең тиімді технологиялық процесс – бір бөлу белгісі – бөлшектердің тығыздығы бойынша жұмыс істейтін ауыр байыту. Көмірді байыту кезінде E_{pm} орташа ықтимал ауытқуы 24–30 кг/м³ жетеді, ал қалайы рудасын байыту кезінде $E_{pm} = 30–60$ кг/м³ жетеді, бұл гидравликалық шөгінділермен, үстелдер мен бұрандалы сепараторлардағы концентрациямен салыстырғанда әлдеқайда жоғары.

Түйінді сөздер: минералды шикізат, байыту, тиімділік, селективтілік, бір функционалдылық, ауыр байыту.

Theory and practice of technological single-functionality in the processes of mineral enrichment

Abstract. The aim of the study is to provide a theoretical justification for the principle of single-functionality using the example of gravitational separation of mineral raw materials according to two separation criteria and to confirm its industrial viability in the enrichment of non-ferrous and ferrous metals, gold, coal, and non-metallic mineral raw materials, with recommendations for improving the technological regime. The result of the research was the development of technological solutions that create conditions for the maximum manifestation of each separation process separately. The most effective technological process is heavy-medium enrichment, which works on one separation criterion: particle density. When enriching hard coal, the average deviation E_{pm} reaches 24–30 kg/m³, and when enriching tin ore, $E_{pm} = 30–60$ kg/m³, which is an order of magnitude higher than hydraulic separation, concentration on tables and screw separators.

Key words: mineral raw materials, enrichment, efficiency, selectivity, single-functionality, heavy-medium enrichment.

Введение

При обогащении полезных ископаемых некоторые аппараты и процессы позволяют осуществлять разделение компонентов по двум-трем признакам или совмещать несколько технологических операций. Например, в условиях гравитационного обогащения имеет место разделение зерен по крупности и плотности. Многофункциональность обеспечивает определенную чистоту продуктов, но затрудняет достижение максимальной эффективности данного технологического передела. При совмещении нескольких операций в одном аппарате, например, дезинтеграции и оттирки, ухудшается технологический режим, потому что невозможно добиться высоких показателей при совмещении несовместимого.

Согласно принципу однофункциональности каждый процесс или аппарат, реагент или разделительная среда имеет только одно технологическое назначение и максимальная эффективность достигается при его однопараметричном исполнении при исключении влияния других разделительных признаков, факторов и процессов [1, 2, 9, 10]. Отклонение от заданных значений по причине совмещения разделительных функций сопряжено с ухудшением общих показателей обогащения минерального сырья. Для повышения селективности сепарационных процессов и улучшения чувствительности разделительных аппаратов необходимо разделение по крупности и плотности зерен осуществлять последовательно в несколько стадий, при использовании узких машинных классов. В условиях гравитационных схем

обогащения, например с применением гидроциклонов, в первой стадии производится разделение по крупности, во второй пески должны обогащаться по плотности с использованием винтовых сепараторов, концентрационных столов, отсадочных машин, тяжелосредных гидроциклонов, гравитационных концентраторов. Предпочтительнее работать на классифицированном питании основных сепарационных процессов, что позволяет улучшить селективность разделения и, как следствие, повысить качество концентрата и извлечение ценных компонентов в концентрат.

Методы исследований

При исследовании данной проблемы применяли следующие методы: теоретическое обоснование принципа однофункциональности и его практическое подтверждение как технологического инструмента повышения эффективности сепарационных процессов при обогащении руд, каменного угля и нерудного минерального сырья.

1. Теоретическое обоснование принципа однофункциональности

Приняв классическое допущение, что при обогащении минерального сырья случайные физические величины подчиняются стандартному непрерывному и равномерному распределению на некотором вероятностном поле, запишем выражение плотности вероятности нормального распределения для одного разделительного признака в виде

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right), \quad (1)$$

где x – параметр разделения;

σ – среднеквадратичное отклонение разделительного параметра;

μ – математическое ожидание.

В практике обогащения полезных ископаемых, полагая, что ошибки при сепарации подчиняются нормальному закону распределения случайной величины, широко используется описание сепарационных характеристик с помощью интеграла вероятности Гаусса:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (2)$$

Значение параметра x представляет собой отклонение средней плотности фракции $\bar{\rho}$ от плотности разделения ρ_p в долях среднеквадратичного отклонения.

С точностью 10^{-3} интеграл Гаусса предпочтительнее вычислять по более простым формулам:

$$\checkmark \quad \text{при } x > 0 \quad F(x) = 1 - \frac{1}{2} \exp(-2^{1/4} x^{4/3});$$

$$\checkmark \quad \text{при } x < 0 \quad F(x) = \frac{1}{2} \exp(-2^{1/4} |x|^{4/3}).$$

Используемый нормальный закон распределения случайной величины – двухпараметрический. Параметры этого распределения: математическое ожидание (здесь граничное значение разделительного признака) и среднее квадратичное отклонение или среднее вероятное отклонение. Если эти параметры известны, то и описание сепарационной характеристики будет вполне определенным.

Результаты многочисленных экспериментальных исследований процессов гравитационного обогащения минерального сырья свидетельствуют о связи точности сепарации с крупностью обогащаемого материала. Учет этой зависимости позволяет обоснованно выбирать технологические схемы обогащения, в частности, пределы крупности машинных классов и их количество.

Мерой точности сепарации при описании сепарационных характеристик гравитационных процессов интегралом вероятности Гаусса является среднее вероятное отклонение разделительного признака E_{pm} , пропорциональное среднему квадратичному. Рассмотрим опорный гравитационный процесс – гидроклассификация.

В процессе гидроклассификации имеет место разделение зерен минерального сырья по двум основным разделительным признакам: крупности и плотности. Показателем равновесного состояния системы, например, при гравитационном обогащении по крупности (плотности) минеральных частиц есть граничная крупность (плотность) разделения, т. е. крупность (плотность) бесконечно узкого класса (фракции), равномерно распределенного в продуктах разделения. Следовательно, асимметрия функции нормального распределения при наличии двух разделительных признаков указывает на снижение точности сепарации и переход системы в новое равновесное состояние при большей погрешности,

т. е. при большем засорении продуктов посторонними фракциями.

При разделении по одному признаку избирательность процесса, как и чувствительность разделительного устройства повышаются, так как в этих условиях упрощается удаление неупотребительного компонента и удержание полезного в составе концентрата, что графически показано на рис. 1 в виде двух графиков сепарационной характеристики соответственно при работе сепаратора одним и двумя разделительными параметрами (рис. 1, а и б). В первом случае (рис. 1а) меньше взаимного засорения продуктов разделения и, как следствие, выше как селективность сепарации, так и чувствительность сепаратора.

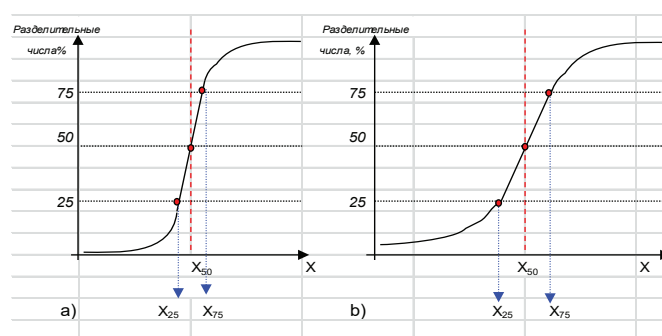


Рис. 1. Сепарационная характеристика при действии одного (1 а) и двух (1 б) разделительных признаков.

Сурет 1. Бір (1 а) және екі (1 б) бөлу белгілерінің әрекетіндегі бөлу сипаттамасы.

Figure 1. Separation characteristics under the action of one (1 а) and two (1 б) separating features.

Такое утверждение согласуется с законами термодинамики, согласно которым всякая система стремится к равновесию, при этом по одному параметру систему легче привести в равновесие, нежели по нескольким параметрам одновременно. Привести систему в равновесие одновременно по всем разделительным признакам затруднительно, точно так же как невозможно осуществить цикл теплового двигателя, одновременно изменяя давление, температуру и объем рабочего тела. Из рис. 1 видно, что средневероятное отклонение, принятое в обогащении полезных ископаемых в качестве критерия эффективности разделения и определяемое по формуле вида

$$E_{pm} = \frac{X_{75} - X_{25}}{2}, \text{ мм} \quad (3)$$

во втором случае, при действии двух разделительных признаков, выше, чем в первом, когда имеет место разделение строго по одному параметру – плотности частиц. Стремление совместить эти процессы сопряжены с нарушением необходимого режима разделения и, как следствие, повышением взаимного засорения продуктов разделения, что выражается в увеличении средневероятного отклонения (E_{pm}), а графически имеет место снижение крутизны сепарационной характеристики.

Физический смысл такого явления состоит в том, что легче привести в равновесие систему с одним, нежели с двумя и более разделительными признаками, а технологи-

ческий смысл сводится к тому, что однопараметричность системы повышает селективность сепарационного процесса [2].

2. Практическая оценка теоретического обоснования

2.1. Обогащение рудного минерального сырья

Для объективной оценки изложенных теоретических положений, касающихся гравитационного разделения, обратимся к работе гидроциклонов и опытным данным распределения железа и кремнезема по классам крупности на второй стадии гидроклассификации в замкнутом цикле с шаровой мельницей. Опробование продуктов гидроциклонирования осуществлялось в условиях действующего производства Ингулецкого ГОКа (таблицы 1 и 2). Как видим, селективность работы гидроциклона по плотности выше, чем его селективность по крупности зерен, технологическим следствием чего есть попадание в пески значительного количества раскрытых зерен магнетита, которые в мельнице переизмельчаются, при этом уменьшается их магнитная восприимчивость и повышается коэрцитивная сила и, как следствие, возрастают потери железа с хвостами и ухудшается качество концентрата. Из таблицы 1 видно, что в песках гидроциклона в классах 0,044–0,071 мм и 0,0–0,044 мм содержание железа общего составляет соответственно 64,8 и 66,6%. При выходе указанных продуктивных классов 8,24 и 17,58% (всего 25,82%) получается, что в условиях второй стадии шарового измельчения и гидроклассификации циркулирует 80 т/час кондиционного магнетитового концентрата. В то же время, в составе слива в расчетном классе -0,044 мм содержание кремнезема достигает 30,18% против 5,45% в песках гидроциклона при содержании железа в продуктивной фракции на уровне 58,7%.

Данные таблиц 1 и 2 свидетельствуют о том, что в гидроциклоне частицы разделяются по крупности и плотно-

сти. Эффективность гидроклассификации по граничной крупности – 0,044 мм составляет 48,0%, что свидетельствует в пользу технологической состоятельности ГЦУ как классификатора, но здесь не принимается во внимание действие второго разделительного признака – плотности зерен. Проявление этого разделительного признака очевидно по извлечению железа и кремнезема в слив гидроциклона, который является выходным продуктом на этом переделе.

При обогащении золота, например, на Кировоградской, Бурибаевской, Сибайской, Жолымбетской обогатительных фабриках, степень концентрации золота в циркулирующем продукте замкнутого цикла измельчения составляет 2–8. Превышение степени концентрации по сравнению с железорудными предприятиями обусловлено более высокой плотностью извлекаемого металла.

Опробование схем измельчения показало, что степень концентрации в песках гидроциклонов по отношению к исходному продукту для различных медных и медно-цинковых руд находится в широких пределах и зависит преимущественно от количества и крупности раскрытых частиц ценного компонента [3, 4]. Результаты гравитационного обогащения (грохочение + тяжелосредная сепарация) руды Варваринского месторождения свидетельствуют о том, что из песков гидроциклонов замкнутого цикла измельчения есть возможность выделения гравитационного концентрата с массовой долей золота более 140 г/т.

Другая технологическая возможность реализована на турецкой ЗИФ «MASTRA». Исследования продуктов разделения в гидроциклонах, работающих в замкнутом цикле с шаровой мельницей (циркулирующая нагрузка – 400%), показали, что тонкие частицы золота преимущественно концентрируются в песках гидроциклонов, при этом степень концентрации по золоту в песках гидроциклонов составляет 8,74 (таблица 3).

Таблица 1

Результаты гидроциклонирования руды (по железу)

Кесте 1

Кенді гидроциклондау нәтижелері (темір бойынша)

Table 1

Results of ore hydrocycloning (by iron)

Класс крупности, мм	Питание ГЦУ			Пески ГЦУ				Слив ГЦУ			
	$Y_{исх}$	$Fe_{общ}$, %	$\mathcal{E}$, %	$Y_{исх}$, %	$Y_{пр}$, %	$Fe_{общ}$, %	$\mathcal{E}$, %	$Y_{исх}$, %	$Y_{пр}$, %	$Fe_{общ}$, %	$\mathcal{E}$, %
1,00–2,00	0,07	31,0	0,04	0,07	0,1	31,0	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
0,560–1,00	1,17	30,60	0,68	1,17	1,6	30,6	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00
0,280–0,560	7,98	32,13	4,87	7,95	10,90	32,1	6,72	0,03	0,10	40,00	0,07
0,140–0,280	9,34	36,65	6,50	9,26	12,70	36,7	8,95	0,08	0,30	30,60	0,17
0,071–0,140	30,85	49,33	28,90	28,66	39,30	50,9	38,43	2,19	8,10	28,80	4,29
0,044–0,071	10,68	58,71	11,90	8,24	11,30	64,8	14,07	2,44	9,00	38,10	6,31
0,000–0,044	39,91	62,18	47,11	17,58	24,10	66,6	30,83	22,33	82,50	58,70	89,15
Итого	100,00	52,67	100,0	72,93	100,0	52,1	100,0	27,07	100,0	54,32	100,0

Примечание: $Y_{исх}$, $Y_{пр}$ – выход классов к исходному и к продуктам разделения, %;

Fe – содержание железа общего, %; $\mathcal{E}$ – извлечение железа в продукты разделения, %

Таблица 2

Результаты гидроциклонирования руды (по кремнезему)

Кесте 2

Кенді гидроциклондау нәтижелері (кремнезем бойынша)

Table 2

Results of ore hydrocycloning (based on silica)

Класс крупности, мм	Питание ГЦУ			Пески ГЦУ				Слив ГЦУ			
	$Y_{исх}$	SiO_2 , %	$\mathcal{E}$, %	$Y_{исх}$, %	$Y_{пр}$, %	SiO_2 , %	$\mathcal{E}$, %	$Y_{исх}$, %	$Y_{пр}$, %	SiO_2 , %	$\mathcal{E}$, %
1,00–2,00	0,07	50,0	0,24	0,07	0,1	50,0	0,348	0,00	0,00	0,00	0,00
0,560–1,00	1,17	45,30	3,41	1,17	1,6	45,3	5,05	0,00	0,00	0,00	0,00
0,280–0,560	7,98	45,31	23,32	7,95	10,90	45,3	34,38	0,03	0,10	47,57	0,26
0,140–0,280	9,34	38,78	23,38	9,26	12,70	38,7	34,22	0,08	0,30	47,78	0,77
0,071–0,140	30,85	7,28	14,51	28,66	39,30	4,03	11,03	2,19	8,10	49,83	21,76
0,044–0,071	10,68	14,20	9,79	8,24	11,30	7,40	5,82	2,44	9,00	37,21	18,05
0,000–0,044	39,91	9,84	25,35	17,58	24,10	5,45	9,15	22,33	82,50	13,30	59,16
Итого	100,00	15,49	100,0	72,93	100,0	52,1	48,31	27,07	100,0	18,55	100,00

Таблица 3

Результаты ситового анализа песков гидроциклонов

Кесте 3

Гидроциклон құмдарын електен талдау нәтижелері

Table 3

Results of sieve analysis of hydrocyclone sands

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание золота, г/т	Содержание серебра, г/т
0,3–0,71	12,70	9,27	3,40
0,71–0,18	35,41	12,08	3,70
0,18–0,106	25,40	16,47	4,80
0,106–0,075	10,86	82,34	19,50
0,075–0,38	7,22	247,60	13,60
0,00–0,038	8,41	247,80	48,50
Итого	100,00	56,79	10,14

Гравитационное дообогащение 1/3 части песков гидроциклонов по плотности в центробежном концентраторе «Кнелсон» позволило выделить гравеоцентрат (таблица 2), сократить циркуляционную нагрузку и сократить расход цианида на стадии выщелачивания руды (таблица 4).

Эффективность гравитационного обогащения полиметаллической оловянной руды различными методами приведена в таблице 5 [5].

Из таблицы 6 видно, что эффективность тяжелосредного обогащения как в барабанных сепараторах, так и в тяжелосредных циклонах, на порядок выше разделения полиметаллической руды на винтовых сепараторах, концентрационных столах, в отсадочных машинах и центробежных концентраторах Кнелсон, что объясняется действием одного разделительного признака – плотности зерен – в условиях тяжелосредной сепарации.

Применение принципа однофункциональности при гравитационном обогащении минералов россыпных место-

рождений позволяет улучшить качественно-количественные показатели разделения и повысить рентабельность переработки руды. Так, при разделении ильменита и сидерита на одном их месторождений Иршанского рудного поля предварительная классификация черного концентрата на узкие классы с последующим их обогащением на концентрационном столе позволило получить ильменитовый концентрат с содержанием ильменита 89,4% при сквозном извлечении 79,11%, в то время как при работе на неклассифицированном питании получен концентрат с содержанием ильменита 77,6% при сквозном его извлечении 31,25%. Если из общего объема материала выделить класс крупности -1+0,14 мм, то ильменита в этом классе будет содержаться 85,06%, а сидерита – 52,6%. Если в дальнейшем произвести разделение по плотности, то в тяжелый продукт будут попадать зерна ильменита всех классов крупности, а также зерна сидерита определенного класса крупности. Этот класс крупности будет определяться в со-

Таблица 4

Результаты обогащения песков гидроциклонов в концентраторе «Кнелсон»

Кесте 4

«Кнелсон» концентраторындағы гидроциклондардың құмдарын байыту нәтижелері

Table 4

Results of hydrocyclone sand enrichment in the Knelson concentrator

Давление воды, бар	Продукты	Выход, %	Содержание металлов, г/т		Извлечение металлов, %	
			Au	Ag	Au	Ag
0,55*	Концентрат	0,99	4339,0	701,0	75,88	59,10
	Хвосты	99,01	13,79	4,85	24,12	40,90
	Исходный	100,00	56,80	11,77	100,00	100,00
0,69	Концентрат	0,96	4304,0	711,0	72,83	58,74
	Хвосты	99,04	15,56	4,84	27,17	41,26
	Исходный	100,00	56,80	11,63	100,00	100,00
0,83	Концентрат	1,00	3705,0	704,0	65,24	56,16
	Хвосты	99,00	19,94	5,55	34,76	43,84
	Исходный	100,00	56,80	12,54	100,00	100,00

Примечание: здесь приведено давление воды, подаваемой в зону разделения через боковые щелевые отверстия концентратора

Таблица 5

Эффективность гравитационного обогащения полиметаллической оловянной руды

Кесте 5

Полиметалл қалайы кенін гравитациялық байытудың тиімділігі

Table 5

Effectiveness of gravity concentration of polymetallic tin ore

Обогатительный аппарат	Средневероятное отклонение, E_{pm} , кг/м ³
Мокрая винтовая сепарация	390
Гидравлическая отсадка	375
Концентрация на столах	495
Цетробежная концентрация в сепараторе Кнелсон	985
Тяжелосредная сепарация в барабане	60
Тяжелосредный циклон	30

ответствии закону равнопадаемости частиц. Так как рудные пески представлены узким гидравлическим классом, то отношение диаметров зерен разных минералов можно считать соответствующим коэффициенту равнопадаемости. Исходя из значений коэффициентов равнопадаемости, следует, что зерна сидерита крупностью от 1,39×0,14 до 1 мм имеют большую вероятность извлечения в тяжелый продукт вместе с ильменитом. Зерна сидерита меньшей крупности имеют больше шансов остаться в легком продукте. Учитывая изложенное, можно утверждать, что использование последовательного чередования сепарации по геометрическим размерам (грохочение) и по плотности (гравитационная сепарация) приведет к повышению селективности сепарации в целом и к повышению чистоты

продуктов, получаемых при обогащении руд россыпных месторождений).

2.2. Обогащение каменного угля

Наиболее высокие качественно-количественные показатели достигаются при обогащении узких классов крупности рядового угля. С увеличением количества машинных классов повышается эффективность обогащения гравитационными и флотационными методами, что подтверждает принцип однофункциональности разделительных процессов. Сейчас для обогащения углей различной крупности применяются следующие технологические процессы: машинный класс +13 мм – тяжелосредная сепарация; класс 3-13 мм – гидравлическая отсадка; машинные классы 1-3

мм и 0,5-1 мм – мокрая винтовая сепарация; и тонкий шлам 0-0,5 мм – флотация. Схемы обогащения угля пятью машинными классами оправдали себя как технологически, так и экономически. На ЦОФ «Октябрьская», «Добропольская» и «Краснолиманская» расчетный годовой экономический эффект в зависимости от производственной мощности ОФ составляет от 100 до 300 тыс. долл. США [6].

Из всех вышеперечисленных операций уникальной является тяжелосредная сепарация [7, 8], так как в этом процессе наиболее полно реализована однопараметричность технологической системы. Разделение полезных ископаемых в тяжелых жидкостях служит разительным примером однофункционального процесса, в котором сепарация осуществляется по контрастности плотности полезного и не полезного компонентов. Наличие тонкодисперсных шламов ухудшает сепарационные характеристики тяжелосредных сепараторов, но это вовсе не означает, что крупность перерабатываемого материала является разделительным

признаком. Высокодисперсные шламы приводят к изменению свойств разделительной среды: повышают ее вязкость и плотность. Таким образом, обогащение по одному разделительному признаку – плотности разделяемых частиц – позволяет добиться максимальной эффективности гравитационного обогащения. Приводим данные тяжелосредного обогащения на примере каменного угля, где эта технология играет определяющую роль (см. таблицу 6).

Из этого вытекает вывод, что взаимозасорение продуктов разделения достигает минимального уровня при разделении по одному признаку. В подтверждение сказанному приведем данные сравнительных промышленных испытаний различных аппаратов в условиях углеобогащительных фабрик (таблица 7).

Ни один процесс гравитационного обогащения типа отсадки или гидроциклонирования, где разделение имеет место по двум признакам (плотности и крупности), не может обеспечить более высоких технологических пока-

Таблица 6
Результаты обогащения угля в тяжелосредном сепараторе при плотности суспензии 1600 кг/м³ и подаче 60 т/ч суспензии на 1 м ширины ванны

Кесте 6
Суспензия тығыздығы 1600 кг/м³ және ваннаның ені 1 м-ге 60 т/сағ суспензия беру жылдамдығы кезінде ауыр-орташа сепаратордағы көмірді байыту нәтижелері

Table 6
Results of coal enrichment in a heavy-medium separator at a suspension density of 1600 кг/м³ and a suspension feed rate of 60 t/h per 1 m of bath width

Крупность угля, мм	Выход класса, %	Плотность разделения, кг/м ³	Средневероятное отклонение, E_{pm} , кг/м ³
50-200	35,43	1650	24
25-50	21,88	1620	27
13-25	17,36	1660	30
6-13	21,63	1680	40
3-6	2,41	1800	110
1-3	0,66	1980	235

Таблица 7
Сравнительные показатели гравитационного обогащения каменного угля в различных технологических аппаратах
Кесте 7
Әр түрлі технологиялық аппараттардағы көмірді гравитациялық байытудың салыстырмалы көрсеткіштері

Table 7
Comparative indicators of gravitational enrichment of coal in various technological devices

Крупность, мм	Тяжелосредный ГЦ		Отсадочная машина		Гидроциклон (ГЦ)	
	δ_p кг/м ³	E_{pm} кг/м ³	δ_p кг/м ³	E_{pm} кг/м ³	δ_p кг/м ³	E_{pm} кг/м ³
13-25	1485	40	1540	65		
6-13	1480	40	1540	65		
3-6	1490	40	1590	80		
1-3	1520	60	1660	90	1420	130
0,5-1	1600	90	1930	215	1600	225
0,25-0,5	1660	160	2140	375	1940	390
0,125-0,25	1590	185				
0,0-0,125	1420	220	2330	440	2350	510

зателей, чем при тяжелосреднем обогащении, что свидетельствует в пользу принципа однофункциональности. В этом случае уместно обогащать каменный уголь трудной и очень трудной категории обогатимости с высоким содержанием породы при минимальном взаимозасорении продуктов разделения в широком диапазоне крупности от 60 мм до 0,2 мм в условиях автоматического гибкого регулирования плотности разделения от 1300 до 2200 кг/м³.

Анализ технологических схем вновь строящихся углеобогатительных фабрик, а также материалы XVI и XVII конгрессов по углеобогащению [8] свидетельствуют, что для обогащения мелкого машинного класса угля повсеместно используются только тяжелосредние гидроциклоны с магнетитовой суспензией. Целесообразность их применения вместо гидравлических отсадочных машин подтверждается значениями E_{pm} для этого оборудования: при низкой плотности разделения (1600 кг/м³) разность в значениях E_{pm} для отсадочной машины Батак и тяжелосреднего гидроциклона для крупности 35–100 мм составляет 54–16 = 38 кг/м³, для крупности 18–5 мм – 60–22 = 38 кг/м³, для крупности 5–18 мм – 66–22 = 44 кг/м³, для крупности 0,5–5 мм – 96–40 = 56 кг/м³ [8].

2.3. Обогащение нерудного минерального сырья

При обогащении кварцевых песков в скруббер – бутаре технологически несовместимы процессы дезинтеграции и оттирки. При подаче кварцевого песка при влажности 6% и последующим добавлением оборотной воды содержание твердого в рабочей зоне колеблется от 24,6 до 32,7%, что обеспечивает эффективное разрыхление, распускание и, как следствие, дезинтегрирование в воде глины, цементирующей и обволакивающей кварцевые зерна. Частоту вращения барабана рекомендуется принимать равной 30–40% критической. Если на этом технологическом переделе преследуется цель дополнительно произвести оттирку

песка, то рассмотренный технологический режим требуют существенных изменений. Эффективная оттирка материала протекает при содержании твердого более 70%, что требует сокращения расхода оборотной воды до 0,4 м³/т. Допуская содержание твердого на уровне 50%, мы вынуждены снизить расход воды до 1,0 м³/т, что отрицательно влияет на процесс дезинтеграции. Что касается конструктивных параметров, то оттирка требует увеличения частоты вращения барабана, итогом чего есть уменьшение времени пребывания материала в рабочей зоне аппарата, что неблагоприятно как для оттирки, так и для процесса дезинтеграции. Таким образом, при подготовке нерудного минерального сырья к обогащению каждому процессу соответствует свой аппарат: дезинтеграции – высокочастотный скруббер при разбавленном питании, оттирке – оттирочная машина при содержании твердого более 70%, грохочению – грохот при содержании твердого в питании менее 40%.

Выводы

1. Совмещение нескольких разделительных признаков в одном технологическом процессе приводит к снижению эффективности обогащения в целом ввиду того, что сложно привести в равновесие систему одновременно по нескольким параметрам.

2. Разработка высокоэффективной технологии и/или аппарата для обогащения минерального сырья сводится к нахождению оптимального сочетания разделительных процессов, учитывая то, что каждому из них соответствует определенное место в иерархической структуре обогатительных переделов в рамках причинно-следственных сепарационных закономерностей.

3. Технологическое совершенство сепарационного процесса проявляется не в совмещении с другими процессами, а в максимальном исключении их взаимовлияния.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Доберсек А., Кирнарский А.С. Технологическое совершенство процессов обогащения железной руды // Горный журнал Казахстана. 2025. № 3. С. 41–49 (на русском языке)
2. Пилов П.И., Кирнарский А.С. Технологическая однопараметричность как инструмент повышения селективности сепарационных процессов // Обогащение руд. 2020. № 2. С. 21–28 (на русском языке)
3. Технология извлечения золота из замкнутого цикла измельчения // Материалы Межд. научн.-практ. конф. «Современные проблемы и инновационные технологии решения вопросов переработки техногенных месторождений Алмалыкского горно-металлургического комбината», Ташкент. 2019. С. 65–67 (на русском языке)
4. Кирнарский А.С. Опыт эксплуатации гидроциклонных установок в замкнутых циклах измельчения медно-цинковых руд: сб. «Збагачення корисних копалин». 2016. № 62 (103). С. 31–38 (на русском языке)
5. Выбор гравитационных сепараторов для обогащения оловянной руды в Ульдджине / Angadi S. [и др.] // Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 2017. № 38 (1). С. 54–61 (на английском языке)
6. Полулях А.Д. Особенности современных технологий углеобогащения: сб. «Збагачення корисних копалин». 2017. № 65 (106). С. 38–44 (на русском языке)
7. Сравнение технологий обогащения. Методы оценки эффективности разделения углей в гравитационных аппаратах с тяжелой средой / Удовичкий В.И. [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 4. С. 49–65 (на русском языке)
8. Обогащение угля в магнетитовой суспензии / А.Д. Полулях, А.С. Бучатский, С.А. Выродов, Д.А. Полулях. Днепропетровск: НГУ. 2016. 512 с. (на русском языке)
9. Доберсек А., Кирнарский А.С. Перспективы снижения энергоемкости обогащения железной руды // Горный журнал Казахстана. 2024. № 6. С. 44–48 (на русском языке)

10. Блехман Л.И. Закономерности осреднения нелинейных зависимостей от колеблющихся параметров – приложение к задачам обогащения руд // Обогащение руд. 2023. № 5. С. 22–27 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Доберсек А., Кирнарский А.С. Темір рудасын байыту процестерінің технологиялық жетілдірілуі // Қазақстанның тау-кен журналы. 2025. № 3. Б. 41–49 (орыс тілінде)
2. Пилов П.И., Кирнарский А.С. Технологиялық бір параметрлік бөлу процестерінің селективтілігін арттыру құралы ретінде // Кендерді байыту. 2020. № 2. Б. 21–28 (орыс тілінде)
3. Айналмалы ұсақтау циклінен алтын алу технологиясы // «Алмалық тау-кен металлургия комбинатының техногендік кен орындарын қайта өңдеу мәселелерін шешудің заманауи мәселелері мен инновациялық технологиялары» Халықаралық ғылым.-практ. конф. материалдары, Ташкент. 2019. Б. 65–67 (орыс тілінде)
4. Кирнарский А.С. Мыс-мырыш кендерін ұнтақтаудың тұйық циклдарындағы гидроциклонды қондырғыларды пайдалану тәжірибесі: «Збагачення корисних копалин» жинағы. 2016. № 62 (103). Б. 31–38 (орыс тілінде)
5. Кенді байыту үшін гравитациялық сепараторларды таңдау / Angadi S. [және т. б.] // Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 2017. № 38 (1). Б. 54–61 (ағылшын тілінде)
6. Полулах А.Д. Көмірді байытудың заманауи технологияларының ерекшеліктері: «Збагачення корисних копалин» жинағы. 2017. № 65 (106). Б. 38–44 (орыс тілінде)
7. Байыту технологияларын салыстыру. Ауыр ортасы бар гравитациялық аппараттардағы көмірді бөлудің тиімділігін бағалау әдістері / Удицкий В.И. [және т. б.] // Кузбасс мемлекеттік техникалық университетінің хабаршысы. 2021. № 4. Б. 49–65 (орыс тілінде)
8. Магнетит суспензиясындағы көмірді байыту / А.Д. Полулах, А.С. Бучатский, С.А. Вродов, Д.А. Полулах. Днепрпетровск: НМУ. 2016. 512 б. (орыс тілінде)
9. Доберсек А., Кирнарский А.С. Темір рудасын байытудың энергия сыйымдылығын төмендету перспективалары // Қазақстанның тау-кен журналы. 2024. № 6. Б. 44–48 (орыс тілінде)
10. Блехман Л.И. Тербелмелі параметрлерге сызықтық емес тәуелділіктерді орташалау заңдылықтары – кендерді байыту міндеттеріне қосымша // Кендерді байыту. 2023. № 5. Б. 22–27 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Dobersek A., Kirnarsky A.S. Tekhnologicheskoe sovershenstvo protsessov obogashcheniya zheleznoi rudy [Technological perfection of iron ore enrichment processes], Gornyi zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. 2025. No. 3. 41–49 pp. (in Russian)
2. Pilov P.I., Kirnarsky A.S. Tekhnologicheskaya odnoparametrichnost' kak instrument povysheniya selektivnosti separatsionnykh protsessov [Technological single-parameterity as a tool for increasing the selectivity of separation processes], Obogashchenie rud [Ore Enrichment]. 2020. No. 2. 21–28 pp. (in Russian)
3. Tekhnologiya izvlecheniya zolota iz zamknutogo tsikla izmel'cheniya [Technology for extracting gold from a closed grinding cycle], Materialy Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Sovremennye problemy i innovatsionnye tekhnologii resheniya voprosov pererabotki tekhnogennykh mestorozhdenii Almalyskogo gorno-metallurgicheskogo kombinata» [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Current Problems and Innovative Technologies for Solving Issues of Processing Technogenic Deposits at the Almalysk Mining and Metallurgical Combine»]. Tashkent. 2019. 65–67 pp. (in Russian)
4. Kirnarsky A.S. Opyt ekspluatatsii gidrotsiklonnykh ustanovok v zamknutykh tsiklakh izmel'cheniya medno-tsinkovykh rud: sb. «Zbagachennya korisnykh kopalin» [Experience in operating hydrocyclone units in closed-cycle grinding of copper-zinc ores: Collection «Enrichment of mineral resources»]. 2016. No. 62 (103). 31–38 pp. (in Russian)
5. Selection of gravity separators for beneficiation of the Uljin tin ore / Angadi S. [et al.] // Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 2017. No. 38 (1). 54–61 pp. (in English)
6. Polulyakh A.D. Osobennosti sovremennykh tekhnologii ugleobogashcheniya: sb. «Zbagachennya korisnykh kopalin» [Features of modern coal beneficiation technologies: Collection «Zbagachennya korisnykh kopalin»]. 2017. No. 65 (106). 38–44 pp. (in Russian)
7. Sravnenie tekhnologii obogashcheniya. Metody otsenki effektivnosti razdeleniya uglei v gravitatsionnykh apparatakh s tyazheloi sredoi [Comparison of enrichment technologies. Methods for evaluating the efficiency of coal separation in gravity devices with a heavy medium], Udovitsky V.I. [et al.], Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitet [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]. 2021. No. 4. 49–65 pp. (in Russian)
8. Obogashchenie uglya v magnetitovoi suspenzii [Coal enrichment in magnetite suspension], A.D. Polulyakh, A.S. Buchatsky, S.A. Vyrodov, D.A. Polulyakh. Dnipropetrovsk: NGU. 2016. 512 p. (in Russian)

9. *Dobersek A., Kirnarsky A.S. Perspektivy snizheniya energoemkosti obogashcheniya zheleznoi rud [Prospects for reducing the energy intensity of iron ore enrichment], Gornyi zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. 2024. No. 6. 44–48 pp. (in Russian)*
10. *Blekhman L.I. Zakonomernosti osredneniya nelineynykh zavisimostei ot koleblyushchikhsya parametrov – prilozhenie k zadacham obogashcheniya rud [Patterns of averaging nonlinear dependencies on fluctuating parameters – application to ore enrichment problems], Obogashchenie rud [Ore Enrichment]. 2023. No. 5. 22–27 pp. (in Russian)*

Сведения об авторах:

Доберсек А., канд. техн. наук, Президент компании «ENGINEERING DOBERSEK GmbH» (г. Менхенгладбах, Германия), albin.dobersek@ed-mg.de; <https://orcid.org/0009-0008-7386-0796>

Кирнарский А.С., доктор техн. наук, научный руководитель проектов по обогащению полезных ископаемых, компания «ENGINEERING DOBERSEK GmbH» (г. Менхенгладбах, Германия), anatoliy.kirnarsky@ed-mg.de; <https://orcid.org/0009-0003-5703-4383>

Авторлар туралы мәліметтер:

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

Кирнарский А.С., техн. ғылымдарының докторы, 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 (Monchengladbach, Germany)

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

 **Machine
Building
and Metal Working**

XVII

МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА

2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА

machinery-expo.kz

Организатор:



МВК «Атакент-Экспо»
Республика Казахстан, 050057, г. Алматы,
ул. Тимирязева, 42
Тел.: +7 (727) 275 09 11, Моб.: +7 701 477 84 18
E-mail: venera@atakentexpo.kz
www.machinery-expo.kz

Официальная поддержка:



Министерство индустрии и
инфраструктурного
развития Республики Казахстан



Казахстан, Алматы
ВЦ «Атакент»

12 - 14 МАЯ