

Код МРНТИ 52.45.17

И.Ю. Мотовилов, *А.К. Абушахманов, Ш.А. Телков, М.Б. Барменшинова
НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева»
(г. Алматы, Казахстан)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ ОБОГАТИМОСТИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛТЫН-ШОКО

Аннотация. В статье исследован фракционный состав железной руды и дана оценка ее гравитационной обогатимости на начальной стадии технологических исследований. Анализ распределения железа по классам крупности и плотностным фракциям позволил предварительно определить степень раскрытия минералов и перспективность гравитационных методов. Рентгенофазовый анализ установил, что основной ценный компонент представлен слабомагнитным гематитом. Ситовый анализ показал равномерное распределение железа по крупности, при этом до 94% железа сосредоточено в классе $-50+2,5$ мм. Обработка кривых гравитационной обогатимости выявила легкое выделение тяжелых фракций с содержанием Fe свыше 55% при плотности разделения $3400\text{--}3500$ кг/м³. Рекомендуются применение отсадки для промышленного обогащения. Работа имеет практическое значение при проектировании схем переработки железных руд Казахстана.

Ключевые слова: железо, минералогический анализ, гранулометрический состав, фракционный состав, кривые гравитационной обогатимости, индекс гравитационной обогатимости, отсадка.

Алтын-Шоко кен орнының құрамында темір бар кеннің гравитациялық байытылуын зерттеу

Анатпа. Мақалада темір кенінің фракциялық құрамы зерттеліп, технологиялық зерттеулердің бастапқы кезеңінде оның гравитациялық байытылуына баға берілді. Темірдің өлшемдік кластары мен тығыздық фракциялары бойынша таралуын талдау минералдардың ашылу дәрежесін және гравитациялық әдістердің перспективасын алдын ала анықтауға мүмкіндік берді. Рентгендік фазалық талдау негізгі құнды компонент әлсіз магнитті гематитпен ұсынылғанын анықтады. Елек талдауы темірдің мөлшері бойынша біркелкі таралуын көрсетті, темірдің 94%-ы $-50+2,5$ мм класында шоғырланған. Гравитациялық байыту қисықтарын өңдеу $3400\text{--}3500$ кг/м³ бөлу тығыздығында Fe мөлшері 55%-дан асатын ауыр фракциялардың жеңіл окшаулануын анықтады. Өнеркәсіптік байыту үшін шөгінділерді қолдану ұсынылады. Қазақстанның темір кендерін қайта өңдеу схемаларын жобалау кезінде жұмыстың практикалық маңызы бар.

Түйінді сөздер: темір, минералогиялық талдау, гранулометриялық құрам, фракциялық құрам, гравитациялық байыту қисықтары, гравитациялық байыту индексі, тұндыру.

Study of gravitational concentration properties of iron-bearing ore at the Altyn-Shoko deposit

Abstract. The paper investigates the fractional composition of iron ore and evaluates its gravity concentrability during the initial phase of technological studies. Analyzing the distribution of iron across size and density fractions helped preliminarily determine the degree of mineral exposure and the potential of gravity methods. X-ray diffraction analysis revealed that the main valuable component is weakly magnetic hematite. The sieving analysis demonstrated a uniform distribution of iron by size, with up to 94% of iron concentrated in the $-50+2,5$ mm fraction. Processing the gravity concentrability curves showed easy separation of heavy fractions with a Fe content exceeding 55% at a separation density of $3400\text{--}3500$ kg/m³. Jigging is recommended for industrial enrichment. The study holds practical significance for designing processing schemes for iron ores in Kazakhstan.

Key words: iron, mineralogical analysis, granulometric composition, fractional composition, gravity enrichment curves, gravity enrichment index, jigging.

Введение

Железные руды характеризуются сложным вещественным и фракционным составом, что в значительной степени определяет их технологическое поведение и выбор рациональных схем переработки [1]. На начальных стадиях технологических исследований особое значение приобретает анализ минералогического состава, распределения полезного компонента по классам крупности и фракциям плотности, позволяющий предварительно оценить степень раскрытия минералов и перспективность применения различных методов обогащения [2, 3].

Одним из ключевых инструментов такой оценки является изучение гравитационной обогатимости руд, основанное на фракционном анализе и построении кривых гравитационной обогатимости. Данные кривые позволяют прогнозировать возможные показатели извлечения и качества концентратов, а также обосновывать целесообразность применения гравитационных методов обогащения еще до проведения опытно-промышленных испытаний [4–6].

В ряде современных исследований показано, что гравитационные методы особенно эффективны при переработке окисленных, слабомагнитных и тонковкрапленных железных руд, а также в составе комбинированных технологических схем [7–9]. При этом именно результаты фракционного анализа и построения кривых гравитационной обогатимости служат основой для выбора типа гравитационного аппарата и параметров процесса [10, 11].

В связи с этим основной целью настоящей статьи является изучение фракционного состава железной руды и построение кривых гравитационной обогатимости для обоснования возможности и эффективности применения гравитационного обогащения на начальной стадии технологических исследований.

Материалы и методы

Объект исследования – технологическая проба железной руды месторождения Алтын-Шоко.

Текстурно-структурные особенности и минеральный состав пробы изучались на поляризационном микроскопе Leica DM2500 M и бинокулярной лупе МБС-1. Рентгенофазовые анализы проводили на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3.

Для определения химического состава исходной руды и продуктов обогащения использовали титриметрический, потенциометрический и атомно-абсорбционные методы анализов.

Гранулометрический состав изучался с использованием стандартного набора сит, мокрым рассевом.

Определение гравитационной обогатимости и технологических условий обогащения железной руды осуществлялось методом фракционного анализа. При изучении фракционного состава готовилась неорганическая тяжелая жидкость «М-45» плотностью 3000 кг/м³, которая растворялась водой для приготовления раствора необ-

ходимой плотности. Фракционный анализ выполнен на классах крупностью -50+10 мм, -10+2,5 мм и -2,5+0,0 мм путем расслоения проб на приготовленных растворах на фракции плотностью: более 4000 кг/м³, 4000–3500 кг/м³, 3500–3000 кг/м³, 3000–2900 кг/м³, 2900–2800 кг/м³, 2800–2700 кг/м³ и менее 2700 кг/м³. Каждая навеска руды последовательно расслаивалась в каждой плотности тяжелой жидкости, начиная с самой высокой, с выделением всплывшей и потонувшей фракции. Полученные фракции промывают водой, высушивают, взвешивают, подвергают разделке, после чего направляют на химический анализ для определения содержания железа.

На основании данных о массе фракций и зольности рассчитывались фракционные составы, по которым строились кривые обогатимости Анри-Рейнгардта для каждого класса крупности. По кривым обогатимости каждого класса крупности находилась величина плотности разделения, соответствующая требуемому содержанию железа в тяжелой фракции и соответственно для суммарного класса крупности и рассчитывались ожидаемые показатели обогащения. По данным фракционного анализа и кривым обогатимости рассчитывался индекс гравитационной обогатимости для каждого класса крупности по формуле (1):

$$I = \frac{100 \cdot \gamma_{\text{л}} \cdot \gamma_{\text{т}}}{\rho_{50} \cdot (\gamma_{\text{л}} + \gamma_{\text{т}}) + 50(\gamma_{\text{л}} - \gamma_{\text{т}})}, \quad (1)$$

где:

ρ_{50} – принятая плотность разделения, кг/м³;

$\gamma_{\text{л}}$ и $\gamma_{\text{т}}$ – выход в процентах смежных фракций с плотностью, меньшей и большей плотности разделения на 100 кг/м³.

Результаты и обсуждение

Исследуемая проба руды была подвергнута проборазделке, руда дробилась до крупности 50 мм, перемешивалась и отбирались представительные пробы на все виды проводимых исследований

Химический состав. Результаты химического и атомно-эмиссионного полуколичественного спектрального анализа свидетельствуют, что в руде основным промышленным металлом является железо – 35,08%. (табл. 1, 2). Содержание вредных примесей в виде серы и фосфора незначительны. Последнее относится и к цветным метал-

лам: меди, цинку, свинцу. Содержание легирующих металлов составляет: никеля 0,0025%, кобальта 0,001%, титана 0,01% и ванадия 0,001% (табл. 1, 2).

Минералогический состав. По составу и характеру распределения рудообразующих минералов железорудное месторождение можно отнести к окисной кремнисто-карбонатно-железородной формации.

Руда представлена тонкодисперсным гематитом в ассоциации с хлоритом, кварцем и кальцитом, с вкрапленностью метакристаллов магнетита, рис. 1.

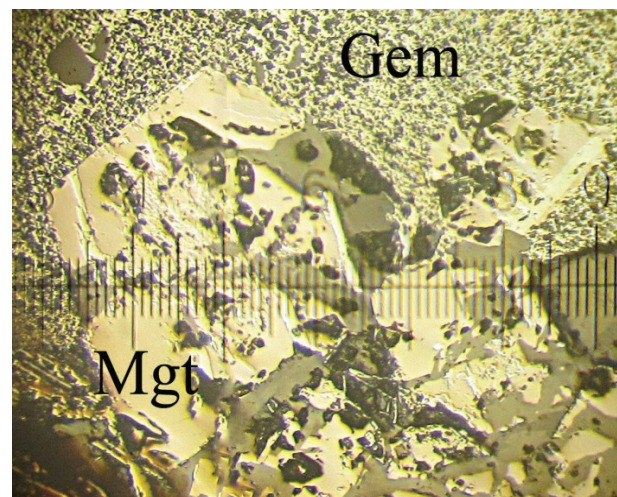


Рис. 1. Восстановление гематита, реликты которого наблюдаются в магнетите (белое), до магнетита, а затем частичное замещение маггемитом, ув. 160, 1 деление = 0,007 мм.

Сурет 1. Реликтері магнетитте дейін тотықсыздануы, содан кейін маггемитпен ішінара алмастыру, ұлғ. 160, 1 бөлім = 0,007 мм.

Figure 1. Reduction of hematite, relics of which are observed in magnetite (white), to magnetite, and then partial substitution with maghemite, hc. 160, 1 division = 0.007 mm.

Основные рудные минералы по данным рентгенофазового анализа представлены гематитом, магнетитом, сидеритом, маггемитом, нерудные – кварц, кальцит, хлорит.

Таблица 1

Химический состав исходной руды

Кесте 1

Бастапқы кеннің химиялық құрамы

Table 1

Chemical composition of the original ore

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Железо, <i>Fe</i>	35,08	Кальций, <i>Ca</i>	7,97
Марганец, <i>Mn</i>	1,41	Магний, <i>Mg</i>	0,3
Сера, <i>S_{общ}</i>	0,08	Свинец, <i>Pb</i>	0,016
Фосфор, <i>P</i>	0,015	Медь, <i>Cu</i>	0,008
Кремний, <i>SiO₂</i>	16,31	Цинк, <i>Zn</i>	0,022

Результаты спектрального анализа пробы исходной руды

Таблица 2

Бастапқы кен сынамасының спектрлік талдауының нәтижелері

Кесте 2

Results of spectral analysis of the original ore sample

Table 2

Элемент	Концент-рация, %	Элемент	Концент-рация, %	Элемент	Концент-рация, %	Элемент	Концент-рация, %
<i>Li</i>	< 0,002	<i>Y</i>	< 0,001	<i>Pd</i>	< 0,0002	<i>Yb</i>	< 0,0001
<i>Os</i>	< 0,001	<i>Au</i>	< 0,0002	<i>Ir</i>	< 0,002	<i>Ge</i>	0,0002
<i>Ag</i>	0,00002	<i>Ba</i>	0,02	<i>V</i>	0,001	<i>Ti</i>	0,01
<i>Bi</i>	< 0,0002	<i>Be</i>	0,0001	<i>Rh</i>	< 0,0005	<i>Zr</i>	0,001
<i>Mn</i>	1	<i>Ga</i>	0,0005	<i>Ru</i>	< 0,001	<i>Sr</i>	< 0,01
<i>W</i>	< 0,002	<i>Al</i>	0,5	<i>Pt</i>	< 0,001	<i>Cd</i>	< 0,0005
<i>Cu</i>	0,003	<i>Si</i>	> 1,0	<i>As</i>	< 0,01	<i>In</i>	< 0,0005
<i>Zn</i>	0,01	<i>Fe</i>	>> 1,0	<i>Sn</i>	0,0002	<i>Ta</i>	< 0,0005
<i>Pb</i>	0,002	<i>K</i>	< 1,0	<i>Cr</i>	0,001	<i>Te</i>	< 0,003
<i>Co</i>	0,001	<i>Na</i>	0,1	<i>La</i>	0,002	<i>Hg</i>	< 0,003
<i>Ni</i>	0,0025	<i>Mg</i>	0,2	<i>Ce</i>	0,005	<i>Ta</i>	< 0,01
<i>Nb</i>	< 0,001	<i>Ca</i>	0,5	<i>Mo</i>	0,0007	<i>Re</i>	< 0,0003

Руда характеризуется чрезвычайно-мелкими, размером от 0,006 мм до тонкодисперсных зернами гематита, образующих сростания с кварцем и кальцитом. На фоне этой тонкодисперсной кремнисто-гематитовой массы наблюдается вкрапленность метакристаллов магнетита размером до 1,5 мм. Происходит восстановление гематита до магнетита, а затем частичное замещение магнетитом. В некоторых метазернах магнетита наблюдается переход магнетита в мартит, степень мартитизации неодинакова, нередко значительная часть магнетита полностью или частично замещена гематитом, либо тончайшие таблички гематита проникают в магнетит по трещинкам.

Из практики обогащения аналогичных железосодержащих руд, железосодержащие минералы извлекают гравитационными процессами.

Гранулометрический состав руды. Результаты ситового анализа с распределением железа по классам крупности приведены на рис. 2.

Руда характеризуется равномерным распределением классов крупности, что характерно рудам с категорией средней крепости.

Содержание железа в классах крупности от 50 до 0,63 мм примерно на одном уровне и варьируется от 34,5% до 40%. Извлечение железа пропорционально выходам.

Основное количество железа извлекается в суммарный класс крупностью -50+2,5 мм и составило 94%, что благоприятно для использования гравитационных процессов.

Технологические свойства руды. Определение гравитационной обогатимости и технологических условий обогащения осуществлялось фракционным анализом.

Фракционный анализ проводился на машинных классах крупности -50+10 мм и -0+2,5 мм предварительно отмытых от глинистых фракций. Выбор этих классов определяется тем, что в них сосредоточено ~ 94% железа.

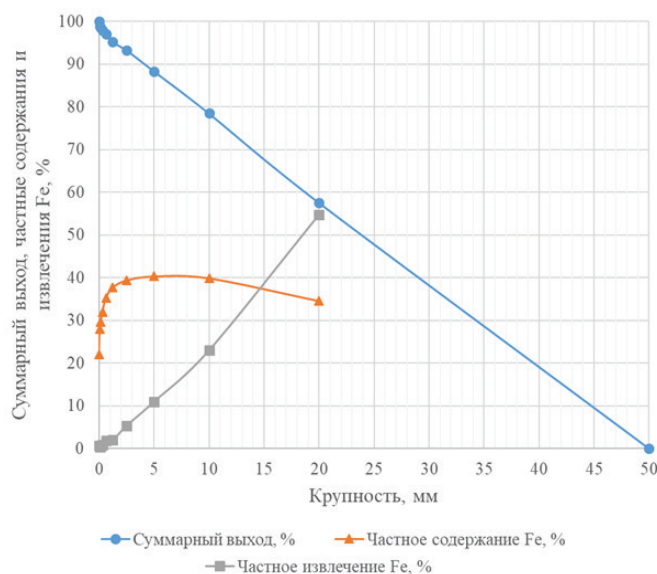


Рис. 2. Результаты ситовых анализов с распределением содержания и извлечения железа по классам крупности.

Сурет 2. Үлкендік кластары бойынша темірдің құрамы мен бөліп алынуының таралуымен елеуіштік талдауларының нәтижелері.

Figure 2. Results of sieve analyses with distribution of iron content and extraction by size classes.

На основании данных о массе фракций и содержании элементов составлялись таблицы фракционного состава, по которым строились кривые обогатимости для каждого класса крупности. По этим кривым находилась плотность разделения, соответствующая требуемому содержанию металлов в тяжелой фракции.

Кривые обогатимости, построенные для машинных классов, приведены на рис. 3.

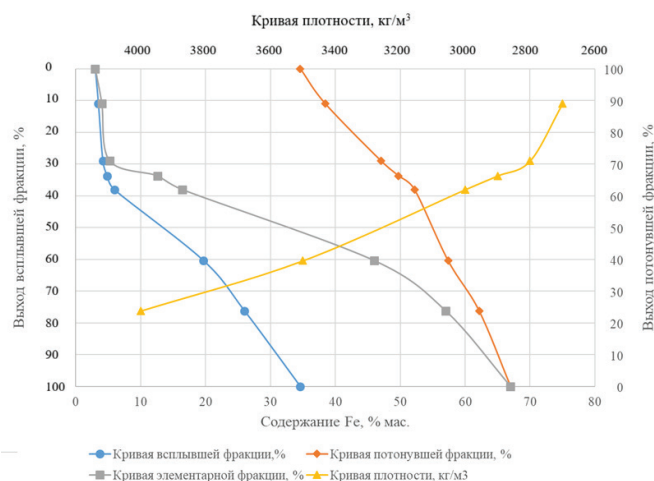


Рис. 3. Кривые гравитационной обогатимости машинного класса -50+10 мм.

Сурет 3. -50+10 мм машина класының гравитациялық байыту қисықтары.

Figure 3. Gravity enrichment curves for machine class -50+10 mm.

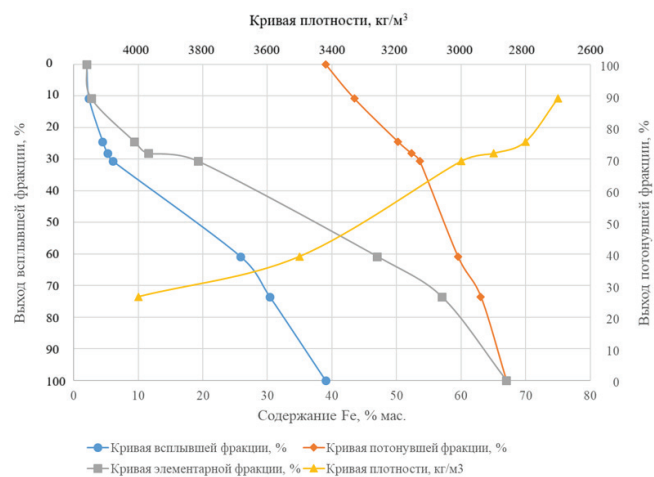


Рис. 4. Кривые гравитационной обогатимости машинного класса -10+2,5 мм.

Сурет 4. -10+2,5 мм машина класының гравитациялық байыту қисықтары.

Figure 4. Gravity enrichment curves for machine class -10+2,5 mm.

Вид кривой плотности разделения в интервале плотностей 3000–3400 кг/м³ имеет крутой угол наклона, что свидетельствует о наличии большого количества промежуточных фракций с содержанием железа от 45 до 50%. Вид кривой плот-

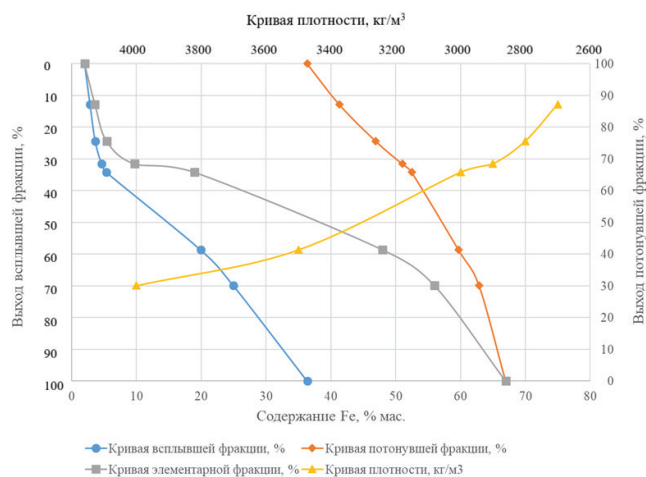


Рис. 5. Кривые гравитационной обогатимости машинного класса -2,5+0,0 мм.

Сурет 5. -2,5+0,0 мм машина класының гравитациялық байыту қисықтары.

Figure 5. Gravity enrichment curves for machine class -2,5+0,0 mm.

ности разделения в интервале плотностей 3400–4000 кг/м³ имеет относительно некрутой угол наклона, это говорит о наличии небольшого количества промежуточных фракций с содержанием железа от 52 до 55%, что свидетельствует о легкой гравитационной обогатимости руды по выделению тяжелой фракции с содержанием железа более 60%. Гравитационная обогатимость руды по выделению легкой фракции с содержанием железа не более 10%, легкая.

В таблице 3 приведен теоретический баланс металлов при разделении машинных классов крупности по плотности 4000 и 3500 кг/м³.

Результаты разделения машинных классов крупности в идеальных условиях показали возможность получения тяжелых концентратных фракций из всех суммарных классов крупности при суммировании машинных классов -50+0,5 мм, получаемые показатели составили:

- по плотности 4000 кг/м³ – общий выход тяжелой фракции 23,78% с содержанием железа 62,88% при извлечении железа 42,25%;

- по плотности 3500 кг/м³ – общий выход тяжелой фракции 38,54% с содержанием железа 57,78% при извлечении железа 63,47%.

В таблице 4 приведены результаты расчета индекса гравитационной обогатимости для плотностей разделения 3800, 3600 и 3400 кг/м³.

Абсолютные величины индексов гравитационной обогатимости для всех классов крупности показывают, что гравитационная обогатимость для всех исследованных классов крупности легкая, таблица 5.

Полученные показатели индексов гравитационной обогатимости позволяют отнести машинные классы крупностью -50+10 мм, -10+2,5 мм и -2,5+0,5 мм к категории легкообогатимых и для их обогащения рекомендуется использовать процесс отсадки, т. к. получение плотности разделения 3500 кг/м³ и более возможно достичь в промышленности только при обогащении в отсадочной машине [11, 12].

Таблица 3

Теоретический баланс металлов, полученный по результатам фракционного анализа

Кесте 3

Фракциялық талдау нәтижелері бойынша алынған металдардың теориялық балансы

Table 3

Theoretical metal balance obtained from fractional analysis results

Наименование продукта	Выход, %	Содержание Fe, %	Извлечение Fe, %	Выход, %	Содержание Fe, %	Извлечение Fe, %
	Плотность разделения 4000 кг/м ³			Плотность разделения 3500 кг/м ³		
Т. фр. -50+10	18,66	62,15	33,05	31,07	57,36	50,79
Т. фр. -10+2,5	3,91	63,05	7,03	5,80	59,50	9,84
Т. фр. -2,5+0,5	1,21	62,88	2,17	1,67	59,72	2,84
Суммарно т. фр. -50+2,5 мм	23,78	62,34	42,25	38,54	57,78	63,47
Л. фр. -50+10	59,83	26,01	44,35	47,42	19,69	26,61
Л. фр. 10+2,5	10,87	30,38	9,41	8,98	25,79	6,60
Л. фр. -2,5+0,5	2,82	25,00	2,01	2,36	19,85	1,34
Суммарно л. фр. -50+2,5 мм	73,52	26,62	55,77	58,76	20,63	34,55
Отсев -0,5+0	2,70	25,79	1,98	2,70	25,79	1,98
Руда	100,00	35,09	100,00	100	35,09	100,00

*примечание: т. фр. – тяжелая фракция плотностью более плотности разделения; л. фр. – легкая фракция плотностью менее плотности разделения

Таблица 4

Индексы гравитационной обогатимости для всех исследованных классов крупности

Кесте 4

Барлық зерттелетін өлім кластары үшін ауырлық гравитациялық байыту индекстері

Table 4

Gravity enrichment indices for all studied size classes

Плотность разделения, кг/м ³	Индекс гравитационной обогатимости		
	Классы крупности, мм		
	-50+10	-10+2,5	-2,5+0,5
3800	0,066	0,053	0,027
3600	0,084	0,084	0,083
3400	0,089	0,119	0,118

Таблица 5

Шкала для оценки обогатимости полезных ископаемых гравитационными методами

Кесте 5

Гравитациялық әдістермен пайдалы қазбалардың байытылуын бағалау шкаласы

Table 5

Scale for assessing the enrichability of minerals by gravity methods

Индекс обогатимости	Обогатимость	Рекомендуемые гравитационные процессы
менее 0,10	легкая	Отсадка, тяжелые суспензии
0,10–0,20	средняя	Отсадка, тяжелые суспензии
0,20–0,30	трудная	Тяжелые суспензии
Более 0,30	очень трудная	Тяжелые суспензии

Заключение

На основании результатов исследований гравитационной обогатимости железосодержащей руды месторождения Алтын-Шоко установлено следующее.

1. Установлено, что основным полезным компонентом исследуемой руды является железо, что определяет технологическую направленность процессов ее переработки.

2. По данным рентгенофазового анализа выявлено, что железо в руде представлено преимущественно гематитом, относящимся к слабомагнитным минералам, а также в подчиненных количествах магнетитом, сидеритом и маггемитом. Породообразующие минералы представлены кварцем, кальцитом и хлоритом. Указанный минералогический состав обуславливает целесообразность применения гравитационных методов обогащения при переработке данной руды.

3. Результаты ситового анализа показали равномерное распределение железа по классам крупности. Основная доля железа (94%) сосредоточена в суммарном классе крупности $-50+2,5$ мм, что соответствует оптимально-

му диапазону крупности для реализации гравитационных процессов обогащения.

4. На основании анализа кривых гравитационной обогатимости машинных классов установлено, что обогатимость исследуемой руды по признаку выделения тяжелых фракций с массовой долей железа более 55% относится к категории легкой. Требуемая плотность разделения при этом составляет 3400–3500 кг/м³.

5. Показано, что достижение плотности разделения 3400–3500 кг/м³ и выше в промышленных условиях возможно преимущественно при применении процесса отсадки. В связи с этим отсадка может быть рекомендована в качестве базового гравитационного метода обогащения исследуемой железосодержащей руды.

Благодарность

Авторы выражают признательность за помощь коллегам и людям, чей вклад в данную работу носил чисто технический характер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование обогащения низкосортной железной руды методами гравитационной и магнитной сепарации / Акбари Х. [и др.] // Российский журнал цветных металлов. 2018. Т. 59. С. 353–363 (на английском языке)
2. Выбор гравитационных сепараторов для обогащения оловянной руды месторождения Ульджин / Ангади С.И. [и др.] // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017. Т. 38. С. 54–61 (на английском языке)
3. Дас А., Саркар Б. Современные методы гравитационного обогащения мелких частиц: обзор // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2018. Т. 39. С. 1–36 (на английском языке)
4. Агломанди А., Эргун Л., Гюльчан Э. Обогащение окисленных руд с использованием тяжелосредных циклонов: имитационное исследование // Physicochemical Problems in Mineral Processing. 2017. Т. 53 (1). С. 379–393 (на английском языке)
5. Извлечение ценных видов сырья с использованием отсадочных машин КОМАГ: лабораторные исследования и промышленное внедрение / Коволь Д. [и др.] // Minerals. 2025. Т. 15 (9). С. 943 (на английском языке)
6. Рат Р.К., Сингх Р. Гравитационное обогащение железных руд: Джамшедпур: Издательство NML, 2007. С. 74–88 (на английском языке)
7. Сингх Р., Мехротра С.П. Обогащение железных руд для черной металлургии // Steel Tech. 2007. № 1. С. 17–32 (на английском языке)
8. Амброс В.М. Гравитационное обогащение в области городского рециклинга: обзор // Recycling. 2023. Т. 8. С. 85 (на английском языке)
9. Производство высококачественных крупных вторичных заполнителей с использованием двухстадийного отсадочного процесса / Гивентер В.Л. [и др.] // Minerals. 2022. Т. 12. С. 532 (на английском языке)
10. Изучение гравитационно-флотационного обогащения свинцово-цинковой руды месторождения Шалкия / Телков Ш.А. [и др.] // Обогащение руд. 2021. № 6. С. 9–15 (на русском языке)
11. Оптимизация параметров отсадочного процесса для обогащения мелких классов железной руды (на примере Tata Steel) / Шукла В. [и др.] // Минеральная инженерия. 2019. Т. 2. С. 165–170 (на английском языке)
12. Майбург Х.А., Нортье А. Эксплуатация и производительность отсадочной фабрики Сишен // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Т. 114. С. 569–574 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Төмен сапалы темір кенін гравитациялық және магниттік бөлу әдістерімен байыту зерттеуі / Акбари Х. [және т. б.] // Түсті металдар жөніндегі Ресей журналы. 2018. Т. 59. Б. 353–363 (ағылшын тілінде)

2. Ульджин кен орнындағы қалайы кенін байыту үшін гравитациялық сепараторларды таңдау / Ангади С.И. [және т. б.] // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2017. Т. 38. Б. 54–61 (ағылшын тілінде)
3. Дас А., Саркар Б. Ұсақ бөлшектерді гравитациялық байытудың заманауи әдістері: шолу // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. Т. 39. Б. 1–36 (ағылшын тілінде)
4. Агломанди А., Эргун Л., Гюльчан Э. Ауыр орталы циклондарды қолдана отырып тотыққан кендерді байыту: модельдеу зерттеуі // *Physicochemical Problems in Mineral Processing*. 2017. Т. 53 (1). Б. 379–393 (ағылшын тілінде)
5. КОМАГ отсадкалық байыту машиналарын қолдану арқылы бағалы шикізатты алу: зертханалық зерттеулер және өнеркәсіптік енгізу / Коволь Д. [және т. б.] // *Minerals*. 2025. Т. 15 (9). Б. 943 (ағылшын тілінде)
6. Рат Р.К., Сингх Р. Темір кендерін гравитациялық байыту: Джамшедпур: NML баспасы, 2007. Б. 74–88 (ағылшын тілінде)
7. Сингх Р., Мехротра С.П. Қара металлургия үшін темір кендерін байыту // *Steel Tech*. 2007. № 1. Б. 17–32 (ағылшын тілінде)
8. Амброс В.М. Қалалық кен өндіру саласындағы гравитациялық байыту: шолу // *Recycling*. 2023. Т. 8. Б. 85 (ағылшын тілінде)
9. Екі сатылы отсадкалық процесс арқылы жоғары сапалы ірі қайта өңделген толтырғыштарды өндіру / Гшвенгер В.Л. [және т. б.] // *Minerals*. 2022. Т. 12. Б. 532 (ағылшын тілінде)
10. Шалқия кен орнының қорғасын-мырыш кендерін гравитациялық-флотациялық байытуды зерттеу / Телков Ш.А. [және т. б.] // *Кендерді байыту*. 2021. № 6. Б. 9–15 (орыс тілінде)
11. Темір кенінің ұсақ фракцияларын байыту үшін отсадкалық процестің параметрлерін оңтайландыру (Tata Steel мысалында) / Шукла В. [және т. б.] // *Минералды инженерия*. 2019. Т. 2. Б. 165–170 (ағылшын тілінде)
12. Майбург Х. А., Нортье А. Сишен отсадкалық фабрикасының жұмысы мен өнімділігі // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014. Т. 114. Б. 569–574 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. A Beneficiation Study on a Low Grade Iron Ore by Gravity and Magnetic Separation / Akbari H. [et al.] // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2018. V. 59. 353–363 pp. (in English)
2. Selection of Gravity Separators for the Beneficiation of the Uljin Tin Ore / Angadi S.I. [et al.] // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2017. V. 38. 54–61 pp. (in English)
3. Das A., Sarkar B. Advanced Gravity Concentration of Fine Particles: A Review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. V. 39. 1–36 pp. (in English)
4. Aghlmandi A., Ergun L., Gulcan E. Beneficiation of oxide ores using dense medium cyclones: A simulation study // *Physicochemical Problems in Mineral Processing*. 2017. V. 53. No. 1. 379–393 pp. (in English)
5. Recovery of Valuable Raw Materials Using KOMAG Jig Beneficiation: Laboratory Studies and Industrial Implementations / Kowol D. [et al.] // *Minerals*. 2025. V. 15. No. 9. 943 p. (in English)
6. Rath R.K., Singh R. Gravity concentration of iron ores. *Advanced Gravity Separation*: Jamshedpur: NML Publication, 2007. 74–88 pp. (in English)
7. Singh R., Mehrotra S.P. (2007). Beneficiation of iron ores for iron and steelmaking. *Steel Tech*. V. 1. 17–32 pp. (in English)
8. Ambros W.M. Gravity Concentration in Urban Mining Applications – A Review // *Recycling*. 2023. V. 8. 85 p. (in English)
9. Production of high-quality coarse recycled aggregates through a two-stage jigging process / Gschwenter V.L. [et al.] // *Minerals*. 2022. V. 12. 532 p. (in English)
10. Izuchenie gravitatsionno-flotatsionnogo obogashcheniya svintsovo-tsinkovoy rudy mestorozhdeniya Shalkiya [Study of gravity-flotation enrichment of lead-zinc ore from the Shalkiya deposit], Telkov Sh.A. [et al.], *Obogashchenie Rud [Ore Dressing]*. 2021. No. 6. 9–15 pp. (in Russian)
11. Optimization of Jigging Process Parameters to Beneficiate Iron Ore Fines – A Case Study of Tatasteel / Shukla V. [et al.] // *Mineral Engineering*. 2019. V. 2. 165–170 pp. (in English)
12. Myburgh H.A., Nortje A. Operation and performance of the Sishen jig plant // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014. V. 114. 569–574 pp. (in English)

Сведения об авторах:

Мотовилов И.Ю., доктор Ph.D, ассоциированный профессор, профессор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), i.motovilov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-0716-402X>

Абушахманов А.К., магистрант 2-го курса кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), a.abushakhmanov@satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0007-3912-9732>

Телков Ш.А., к. т. н., доцент, профессор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), s.telkov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6641-4802>

Барменишинова М.Б., к. т. н., ассоциированный профессор, заведующая кафедрой «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), m.barmenshinova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-0534-2387>

Авторлар туралы мәліметтер:

Мотовилов И.Ю., «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды өңдеу» кафедрасының профессоры, қауымдастырылған профессор, Ph.D докторы (Алматы қ., Қазақстан)

Абушахманов А.К., «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды өңдеу» кафедрасының 2-ші курс магистранты (Алматы қ., Қазақстан)

Телков Ш.А., «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды өңдеу» кафедрасының профессоры, т. ғ. к. (Алматы қ., Қазақстан)

Барменишинова М.Б., «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті» КЕАҚ, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының меңгерушісі, т. ғ. к., қауымдастырылған профессор (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Motovilov I.Yu., Ph.D, Associate Professor, Professor of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev» (Almaty, Kazakhstan)

Abushakhmanov A.K., 2nd year Master's student of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev» (Almaty, Kazakhstan)

Telkov Sh.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev» (Almaty, Kazakhstan)

Barmenshinova M.B., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Metallurgy and mineral processing», NJSC «K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University» (Almaty, Kazakhstan)

Организатор:

Техническая поддержка:

окрыжной выставочный центр

• ЮГОРСКИЕ КОНТРАКТЫ •

EXPOTECHMEMBER
OF THE RUSSIAN
UNION OF EXHIBITIONS
AND FAIRSЧЛЕН
РОССИЙСКОГО
СОЮЗА ВЫСТАВОК
И ЯРМАРОК31 МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЫСТАВКА**СУРГУТ.
НЕФТЬ И ГАЗ
2026**31th INTERNATIONAL
SPECIALIZED
TECHNOLOGICAL EXHIBITION**SURGUT.
OIL & GAS
2026****23.09 - 25.09**+7 (3462) 94-34-54
sales@yugcont.ru
sngexpo.ruг. Сургут,
СОК «Энергетик»
ул. Энергетиков, 47