

СРАВНЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ И ГРОХОТОВ В ЗАМКНУТОМ ЦИКЛЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТИТАНОМАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ

А.Е. Пелевин¹, Н.А. Сытых²

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,
e-mail: a-pelevin@yandex.ru

² ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат, Качканар, Россия

Аннотация: Целью выполненных исследований явилось сравнение результатов применения грохотов и гидроциклонов в замкнутом цикле измельчения второй стадии схемы обогащения титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения. Использование грохотов вместо гидроциклонов в замкнутом цикле привело к увеличению массовой доли железа с 58,9 до 62,8% в магнитном продукте мокрой магнитной сепарации третьей стадии. Это говорит о возможности сокращения числа стадий измельчения с трех до двух. Грохот по сравнению с гидроциклоном обеспечил большую на 22,08% эффективность классификации по классу $-0,071$ мм и большее на 28,07% извлечение класса -71 мкм в мелкий продукт. Это позволило снизить с 176,4 до 99,8% циркулирующую нагрузку второй стадии измельчения. Применение грохотов в замкнутом цикле измельчения позволяет повысить раскрытие рудных и породных минералов и снизить их переизмельчение. Это приводит к повышению эффективности обогащения в магнитных сепараторах второй и третьей стадий. Уменьшение переизмельчения рудных и породных минералов привело к снижению массовой доли класса $-0,071$ мм в концентрате с 93,2 до 68,1% при использовании грохотов вместо гидроциклонов. Поэтому схему с двухстадийным измельчением с использованием грохотов во второй стадии можно использовать для производства концентрата для агломерации. При производстве концентрата для окомкования двухстадийную схему применять нецелесообразно.

Ключевые слова: титаномагнетитовая руда, стадия измельчения, удельная производительность мельницы, тонкое грохочение, раскрытие породных минералов, подрешетный продукт, массовая доля твердого, массовая доля железа.

Для цитирования: Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Сравнение использования гидроциклонов и грохотов в замкнутом цикле измельчения титаномагнетитовой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 154–166. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_154.

Efficiency of screens and hydrocyclones in closed-cycle grinding of titanomagnetite ore

A.E. Pelevin¹, N.A. Sytykh²

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: a-pelevin@yandex.ru

² EVRAZ Kachkanar Mining and Processing Plant, Kachkanar, Russia

Abstract: The research aimed to compare efficiency of screens and hydrocyclones in closed-cycle grinding at the second stage of the processing flowsheet for titanomagnetite ore from Gusevogorskoe deposit. Replacement of hydrocyclones by screens in the closed cycle of grinding resulted in the increase in the mass fraction of iron from 58.9 to 62.8% in the magnetic product of wet magnetic separation at the third stage of the processing flowsheet. This implies possibility to reduce the number of grinding stages from three to two. The screen as compared with the hydrocyclone ensures higher efficiency of 0.071 mm size grade sizing by 22.08% and better extraction of 71 μm to underflow by 28.07%. This allows reducing the circulating load at the second stage of grinding from 176.4 to 99.8%. The introduction of screens in the closed cycle of grinding makes it possible to improve dissociation of ore and rock minerals and to decrease overgrinding. The total efficiency of magnetic separation at the second and third stages increases as a result. Owing to the decreased overgrinding of ore and rock minerals due to the use of screens instead of hydrocyclones, the mass fraction of 0.071 mm size is reduced in the concentrate from 93.2 to 68.1%. For these reasons, the two-stage grinding flowsheet with the screens included in the second stage is usable for production of concentrate for agglomeration. Pelletization concentrate production using the two-stage flowsheet is inexpedient.

Key words: titanomagnetite ore, grinding stage, specific mill capacity, fine screening, dissociation of rock minerals, undersize, solid mass fraction, iron mass fraction.

For citation: Pelevin A. E., Sytykh N. A. Efficiency of screens and hydrocyclones in closed-cycle grinding of titanomagnetite ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5):154-166. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_154.

Введение

В настоящее время практически на всех железообогатительных фабриках России в схемах обогащения испытано или применяется тонкое гидравлическое грохочение. Процесс тонкого грохочения достаточно изучен [1–4]. Применение грохочения обосновывается большей эффективностью разделения по крупности по сравнению с гидроциклонами. Теоретически это не вызывает сомнений, учитывая различные принципы разделения по крупности в грохотах и гидроциклонах.

С помощью применения тонкого гидравлического грохочения решаются следующие задачи, позволяющие повысить эффективность обогащения.

1. Снижение затрат на измельчение за счет применения грохотов вместо гидроциклонов в замкнутых циклах измельчения. Такое решение позволяет сокра-

тить количество стадий измельчения [5] или уменьшить объем измельчительного оборудования. Однако это повышает крупность производимого концентрата (что недопустимо при производстве концентрата для окомкования) и препятствует повышению производительности обогатительной фабрики.

Для увеличения производительности фабрики известны рекомендации использовать в замкнутом цикле измельчения гидроциклоны вместо грохотов, а грохоты использовать для доводки концентрата [6].

2. Стадиальное выделение концентрата перед последней стадией измельчения. Эта технология основана на повышении массовой доли железа в мелких классах крупности при измельчении магнетитовых руд и позволяет уменьшить объем измельчительного оборудования или повысить производительность

фабрики [7]. Для этой цели могут использоваться и другие аппараты, но применение грохотов приводит к достижению более высоких технологических показателей [8].

3. Повышение качества производимого концентрата [9–11]. Применение такой технологии также основано на повышении массовой доли железа в мелких классах крупности концентрата по сравнению с более крупными классами.

Несмотря на предпочтительность применения грохота для разделения по крупности, грохот не сможет полностью заменить гидроциклон в схемах обогащения магнетитовых руд. Гидроциклон является основным классифицирующим аппаратом, применяемым в замкнутом цикле измельчения [12, 13]. Достоинством применения гидроциклонов по сравнению с грохотами является бóльшая производительность, а также меньшие капитальные и эксплуатационные затраты и объем производственного здания, требуемый для установки гидроциклонов.

Целью применения стадии измельчения в схеме переработки любого типа руды является получение продукта с требуемой крупностью для последующего процесса обогащения. Это достигается путем оптимизации режимов работы мельницы [14–16], которые в том числе будут зависеть от типа применяемого классифицирующего аппарата (гидроциклон или грохот).

Целью выполненных исследований явилось сравнение результатов применения грохотов и гидроциклонов в замкнутом цикле измельчения второй стадии обогащения титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения.

Характеристики испытанных схем и методики исследований

Схема обогащения титаномагнетитовой руды на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа состоит из сухой

магнитной сепарации, трех стадий измельчения и четырех стадий мокрой магнитной сепарации (ММС). Первая стадия измельчения осуществляется в стержневых мельницах. Особенностью схемы второй стадии измельчения является использование обогатительной операции (ММС-II) внутри замкнутого цикла. Во вторую стадию измельчения подается промпродукт ММС-I с крупностью $-3+0$ мм.

Испытания выполнены в промышленных условиях на технологических секциях по производству концентрата для окомкования с массовой долей железа не менее 62% и с крупностью не менее 92% класса -71 мкм. Оценивалась возможность использования двухстадиальной схемы измельчения. Испытаны две схемы.

- Схема 1 является существующей трехстадиальной схемой с использованием двух гидроциклонов ГЦ-710 с мельницей МШЦ-3600х5500 во второй стадии измельчения (рис. 1, а).

- Схема 2 характеризуется применением двух стадий измельчения с использованием во второй стадии двух грохотов Derrick 2SG40-60W-5STK с полиуретановыми панелями ТН48х30-0,10МТ (размер 0,1 мм) для разделения по крупности вместо двух гидроциклонов ГЦ-710 (рис. 1, б).

Основными критериями при сравнении двух схем явились достигнутые технологические показатели, а также показатели эффективности работы основного оборудования второй стадии измельчения (мельница, магнитные сепараторы, грохоты и гидроциклоны).

Сравнение эффективности разделения по крупности в грохотах и гидроциклонах выполнено при равнозначных значениях массовых долей класса -71 мкм в питании аппаратов. При этом питание грохотов и гидроциклонов характеризовалось низкой массовой долей класса

–71 мкм (26–28%). Основными критериями при сравнении явились сепарационные характеристики аппаратов (по крупности) и эффективность классификации. В качестве дополнительного критерия использована величина извлечения класса –71 мкм в мелкий продукт. Эффективность грохочения не использована в качестве критерия для сравнения по причине ее неприменения для оценки работы гидроциклонов. Для сравнения эффективности обогащения в барабанных магнитных сепараторах по испытанным схемам дополнительно использован критерий Ханкока-Луйкена.

Массовая доля твердого в питании гидроциклонов и грохотов специально не регулировалась, в связи с отсутствием систем автоматизации «насос–гидроциклон (грохот)». Использован насос 8Гр-8 с объемной производительностью 400 м³/ч. Уровень пульпы в зумпфе регулировался ручным способом. Выходы продуктов классификации получены расчетным способом с использованием массовых долей класса –71 мкм, опреде-

ленных в отобранных пробах. Выходы продуктов мокрой магнитной сепарации (ММС) рассчитаны с помощью уравнения технологического баланса с использованием массовых долей железа в отобранных пробах.

Результаты промышленных испытаний и их обсуждение

Технологические балансы испытанных схем обогащения и показатели второй стадии измельчения приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Сравнение технологических балансов схемы 2 (две стадии измельчения) и схемы 1 (три стадии измельчения) показывает, что достигнутые результаты по железу практически не отличаются. Это позволяет говорить о возможности использования двухстадийной схемы измельчения. Однако по причине значительного снижения массовой доли класса –71 мкм в концентрате (с 93,2 до 68,1%) схему 2 можно использовать только для производства концентрата для агломерации (см. табл. 1). При произ-

Таблица 1

Технологические балансы схем обогащения (данные 2007 г.) Circuit inventories of processing flowsheets (as of 2007)

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение Fe, %
		Fe	–71 мкм	
Схема 1 (три стадии измельчения, классификация в гидроциклонах)				
Концентрат	16,51	62,70	93,20	66,57
Хвосты	83,49	6,23	–	33,43
Руда	100,00	15,55	–	100,00
Схема 1 (две стадии измельчения, классификация в гидроциклонах)				
Концентрат	17,96	58,90	71,80	68,03
Хвосты	82,04	6,06	–	31,97
Руда	100,00	15,55	–	100,00
Схема 2 (две стадии измельчения, грохочение; 0,1 мм)				
Концентрат	16,36	62,80	68,10	66,41
Хвосты	83,64	6,21	–	33,59
Руда	100,00	15,47	–	100,00

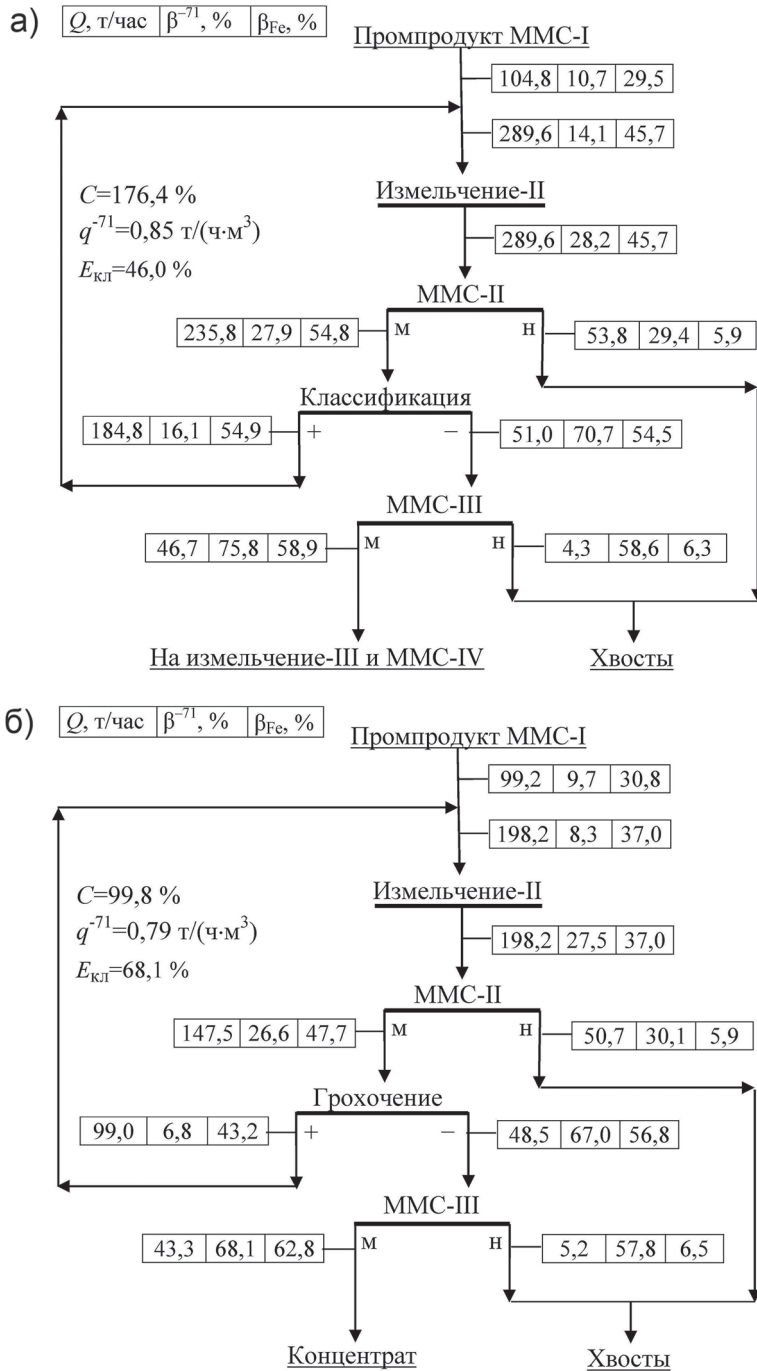


Рис. 1. Схемы 1 и 2 второй стадии измельчения с применением гидроциклонов (а) и грохотов (б)
 Fig. 1. Layouts of grinding stages 1 and 2 using hydrocyclones (a) and screens (b)

Таблица 2

Результаты разделения по крупности в гидроциклонах и грохотах во второй стадии измельчения (данные 2007 г.)

Size classification data of hydrocyclones and screens at the second stage of grinding (as of 2007)

Продукт	Производительность, т/ч	Выход, %	Массовая доля, %		Эффективность классификации, %	Извлечение класса -71 мкм, %
			-71 мкм	Fe		
Гидроциклон ГЦ-710, схема 1						
Слив	25,48	21,61	70,7	54,50	45,98	54,77
Пески	92,41	78,39	16,1	54,87		
Исходный	117,89	100,00	27,9	54,79		
Грохот Derrick, схема 2						
Подрешетный	24,26	32,89	67,0	56,80	68,06	82,84
Надрешетный	49,50	67,11	6,8	43,20		
Исходный	73,76	100,00	26,6	47,67		

водстве концентрата для окомкования схему 2 применять нецелесообразно.

Концентрат, полученный по схеме 2, можно отдельно доизмельчить в измельчающих валках высокого давления (ИВВД), что применяется в мировой практике [17, 18]. Но это должно решаться на основании технико-экономического сравнения вариантов с использованием ИВВД или шаровой мельницы для доизмельчения концентрата [19] в третьей стадии измельчения и в настоящей статье не рассматривается.

Результаты обогащения с применением схемы 2, по сравнению с вариантом схемы 1 с двумя стадиями измельчения, позволяют говорить о более высокой эффективности использования грохотов вместо гидроциклонов в замкнутом цикле измельчения. Критерием эффективности в этом случае является значительное увеличение массовой доли железа в концентрате ММС-III — на 3,9% (с 58,9 до 62,8%).

Рассмотрим эффективность работы оборудования в отдельных операциях второй стадии измельчения (см. рис. 1) при применении схем 1 и 2.

В табл. 2 приведены средние результаты применения гидроциклонов и грохотов в схемах 1 и 2. Производительность приведена для одного аппарата при массовой доле твердого в питании гидроциклона и грохота, равной 46–47% и 29–31%, соответственно.

Грохот по сравнению с гидроциклоном обеспечил большую эффективность классификации по классу -71 мкм (на 22,08%) и большее извлечение класса -71 мкм в мелкий продукт (на 28,07%). Массовая доля класса -71 мкм в надрешетном продукте (6,8%) значительно ниже, чем в песках (16,1%). Выход (к операции) подрешетного продукта (32,89%) существенно выше выхода слива (21,61%). Это позволило значительно снизить циркулирующую нагрузку (с 176,4 до 99,8%) второй стадии измельчения сравниваемых схем 1 и 2 (см. табл. 2, рис. 1).

Однако массовая доля класса -71 мкм в сливе гидроциклона на 3,7% больше по сравнению с подрешетным продуктом грохота (см. табл. 2). Это произошло по причине большего извлечения в подрешетный продукт грохота классов

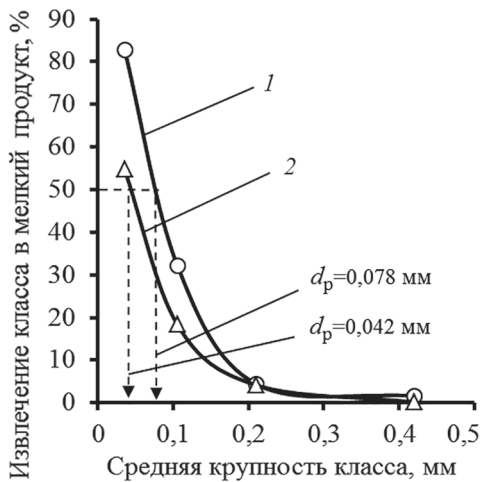


Рис. 2. Сепарационные характеристики грохотов и гидроциклонов: 1 — грохот; 2 — гидроциклон
 Fig. 2. Separation capacity characteristics of screens and hydrocyclones

–0,14+0,071, –0,28+0,14 и –0,56+0,28 мм по сравнению со сливом гидроциклона. Граница разделения в гидроциклоне (0,042 мм) ниже, чем в грохоте (0,078 мм), что привело к большей крупности подрешетного и надрешетного продуктов по сравнению со сливом и песками гидроциклона (рис. 2).

Таблица 3

Результаты ММС-II измельченного продукта при использовании гидроциклонов и грохотов во второй стадии измельчения (данные 2007 г.)
Results of WMS-II (wet magnetic separation) of ground product with hydrocyclones and screens at the second stage of grinding (as of 2007)

Продукт	Производительность, т/ч	Выход к операции, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение Fe, %	Эффективность обогащения, %
Схема 1 (гидроциклон ГЦ-710)					
Магнитный	235,77	81,41	54,79	97,60	29,82
Немагнитный	53,85	18,59	5,90	2,40	
Измельченный	289,62	100,00	45,70	100,00	
Схема 2 (грохот Derrick)					
Магнитный	147,52	74,44	47,67	95,92	34,10
Немагнитный	50,67	25,56	5,90	4,08	
Измельченный	198,19	100,00	36,99	100,00	

В целом грохот показал бóльшую эффективность для разделения по крупности по сравнению с гидроциклоном. При использовании грохотов вместо гидроциклонов прирост класса –71 мкм при измельчении в мельнице значительно увеличился (с 14,1 до 19,2%). Однако это не привело к увеличению удельной производительности мельницы по классу –71 мкм (произошло даже снижение с 0,85 до 0,79 т/(ч·м³)).

Достоинством использования грохота по сравнению с гидроциклоном в схемах обогащения магнетитовых руд является повышенная массовая доля железа в подрешетном продукте по сравнению с надрешетным (см. табл. 2). Обедненный надрешетный продукт поступает на доизмельчение и далее на ММС-II (см. рис. 1, б). Чем ниже массовая доля железа в питании магнитных сепараторов, тем выше будет их эффективность при выделении хвостов, что приведет к выводу из замкнутого цикла более богатого по железу продукта (подрешетного).

В табл. 3 показаны результаты магнитного обогащения измельченных продуктов в операциях ММС-II схем 1 и 2

Таблица 4

Результаты ММС-III конечных продуктов второй стадии измельчения схем 1 и 2 (данные 2007 г.)
Results of WMS-III of final products after the second stage of grinding in flowsheets 1 and 2 (as of 2007)

Продукт	Производительность, т/ч	Выход к операции, %	Массовая доля Fe, %	Извлечение Fe, %	Эффективность обогащения, %
Схема 1 (гидроциклон ГЦ-710)					
Магнитный	46,70	91,64	58,90	99,04	16,26
Немагнитный	4,26	8,36	6,25	0,96	
Слив	50,96	100,00	54,50	100,00	
Схема 2 (грохот Derrick)					
Магнитный	43,35	89,35	62,80	98,79	21,85
Немагнитный	5,17	10,65	6,46	1,21	
Подрешетный	48,52	100,00	56,80	100,00	

(см. рис. 1). Производительность приведена для операции ММС-II, включающей три сепаратора ПБМ-П-90/250. Применение грохота в замкнутом цикле измельчения вместо гидроциклонов привело к повышению эффективности магнитного обогащения (на 4,28%), что связано со значительным увеличением с 18,59 до 35,56% выхода хвостов к операции ММС-II (табл. 3). Повышение эффективности обогащения также связано со снижением производительности магнитных сепараторов операции ММС-II в связи с уменьшением циркулирующей нагрузки.

В табл. 4 приведены результаты магнитного обогащения в операциях ММС-III слива (схема 1) и подрешетного продукта (схема 2). Производительность приведена для операции ММС-III, включающей три сепаратора ПБМ-ПП-90/250.

Использование во второй стадии измельчения грохота вместо гидроциклонов привело к увеличению эффективности магнитного обогащения подрешетного продукта в операции ММС-III по сравнению со сливом с 16,26 до 21,85% (на 34,36% отн.). Выход хвостов к операции ММС-III увеличился с 8,36 до

10,65% (на 27,43% отн.). Одним из результатов испытаний, подтверждающим повышенную обогатимость подрешетного продукта, является больший прирост массовой доли железа в магнитном продукте ММС-III по сравнению с исходным питанием: 4,4% (для слива) и 6,0% (для подрешетного продукта). В результате этого массовая доля железа в магнитном продукте ММС-III, полученном из подрешетного продукта, составила 62,8%, что позволяет отнести этот продукт к концентрату. Массовая доля железа в магнитном продукте ММС-III, полученном из слива, составила 58,9%, что говорит о необходимости его доизмельчения и дообогащения для получения концентрата (см. табл. 4).

Достоинства применения тонкого грохочения в замкнутых циклах измельчения магнетитовых руд

Использование грохотов в замкнутом цикле измельчения не повышает удельную производительность мельницы за счет лучшего разделения по крупности по сравнению с гидроциклонами, но приводит к снижению циркулирующей

нагрузки. Кроме этого, грохот частично работает как обогатительный аппарат, что проявляется в повышенной массовой доле железа в подрешетном продукте по сравнению с надрешетным продуктом. Это создает условия для повышения показателей обогащения в барабанных магнитных сепараторах, применяемых в замкнутом цикле измельчения. Поэтому технологическая эффективность применения тонкого грохочения повышается при использовании в замкнутом цикле измельчения операции мокрого магнитного обогащения на сливе мельницы (см. рис. 1).

Основным достоинством применения грохота в замкнутом цикле измельчения является снижение переизмельчения титаномагнетита (магнетита) и породных минералов. При этом снижение переизмельчения породных минералов не менее важно, чем снижение переизмельчения рудных минералов, так как это позволяет с большей эффективностью выводить породные минералы в хвосты обогащения. Отсутствие в питании магнитных сепараторов тонких породных частиц значительно снижает «вредное» явление магнитной флокуляции при получении концентратов [20]. Поэтому массовая доля железа в магнитном продукте значительно выше, если питанием ММС-III является измельченный продукт замкнутого цикла с грохотами (подрешетный продукт), по сравнению с измельченным продуктом замкнутого цикла с гидроциклонами (слив).

Использование грохотов в замкнутом цикле измельчения позволяет получать концентраты при большей их крупности (см. табл. 1). Это говорит не только о снижении переизмельчения минералов, но и о лучшем раскрытии рудных и породных минералов.

Повышение крупности концентрата при использовании грохотов в замкнутом цикле измельчения позволит сокра-

тить объем измельчительного оборудования. При этом можно сократить число стадий измельчения (см. табл. 1) или сократить объем мельниц в стадиях измельчения. Однако такая технология в основном применима при производстве концентрата для агломерации. Именно поэтому схема 2 не используется на Качканарском ГОКе на секциях по производству концентрата для окомкования.

Недостатки применения тонкого грохочения в замкнутых циклах измельчения магнетитовых руд

Недостатки применения грохотов в замкнутом цикле измельчения по сравнению с гидроциклонами связаны с повышенными капитальными затратами (требуется больший объем здания на установку единицы оборудования и бóльшая цена грохота) и с увеличением эксплуатационных затрат (повышенный износ сит грохотов).

Выполненные промышленные испытания показали, что применение двух грохотов на одной технологической секции не позволяет получить концентрат для окомкования, но при использовании двухстадиальной схемы измельчения позволяет получить концентрат для агломерации. Однако установка двух грохотов на одной секции невозможна в существующем производственном здании. Поэтому эта технология не была принята к внедрению на Качканарском ГОКе.

При испытаниях схемы 2 на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа выявлен недостаток применения грохотов в замкнутом цикле измельчения второй стадии, связанный с повышенным износом полиуретановых сит с размером 0,1 мм. Это во многом связано с повышенной крупностью питания грохотов (26–28% класса –71 мкм). Поэтому при использовании в первой стадии стерж-

невого измельчения не следует применять во второй стадии измельчения грохоты с размером отверстий сит 0,1 мм и менее. Можно предположить, что применение в первой стадии шарового измельчения позволит значительно увеличить продолжительность использования сит грохота.

Вышеприведенные результаты применения грохотов в замкнутом цикле измельчения справедливы при стабильной работе грохотов и другого оборудования замкнутого цикла. Стабильность работы грохота будет определяться, прежде всего, его производительностью. Предельная максимальная производительность одного грохота, достигнутая при испытаниях, составила порядка 75 т/ч (см. табл. 2) при массовой доле твердого в питании порядка 30%. При увеличении нагрузки на один грохот выше 75 т/ч происходит резкое снижение выхода подрешетного продукта и повышение циркулирующей нагрузки, что вызывает необходимость значительного снижения производительности технологической секции обогатительной фабрики. Это является главным недостатком применения грохота в замкнутом цикле измельчения. Гидроциклон менее чувствителен к колебаниям производительности и свойств исходного питания. Поэтому для повышения эффективности применения грохотов в схемах обогащения железных руд необходимо обеспечить стабильность свойств рудной шихты (повысить эффективность горных работ).

Выводы

1. Использование грохотов вместо гидроциклонов в замкнутом цикле измельчения второй стадии приводит к повышению эффективности разделения по крупности, что позволяет снизить циркулирующую нагрузку, но не повысить удельную производительность мельницы по классу –71 мкм.

2. Применение грохотов вместо гидроциклонов в замкнутом цикле дало возможность получить концентрат с требуемой массовой долей железа (62%) уже после второй стадии измельчения. Это позволяет говорить о вероятности снижения количества стадий измельчения существующей схемы с трех до двух. При использовании двухстадиальной схемы с тонким грохочением массовая доля класса –71 мкм в концентрате снизилась с 93,1 до 68,1%. Поэтому испытанную двухстадиальную схему можно использовать при производстве концентрата для агломерации. Для получения концентрата для окомкования следует использовать трехстадиальную схему с применением гидроциклонов в третьей стадии.

3. Использование грохотов в замкнутом цикле измельчения позволяет повысить раскрытие рудных и породных минералов и снизить их переизмельчение. Это подтверждается повышением эффективности обогащения в последующих стадиях мокрой магнитной сепарации.

4. Недостатками применения грохотов в замкнутом цикле измельчения являются увеличение крупности производимого концентрата, резкое снижение эффективности грохочения при увеличении производительности выше допустимого значения и повышенный износ просеивающих поверхностей.

Вклад авторов

Пелевин А.Е. — постановка задачи исследования; участие в экспериментальных работах; выполнение работы по систематизации материала; анализ результатов исследования; написание текста статьи.

Сытых Н.А. — постановка задачи исследования; руководство работами по получению экспериментальных результатов; получение данных для анализа; написание текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайсберг Л. А., Коровников А. Н. Тонкое грохочение как альтернатива гидравлической классификации по крупности // Обогащение руд. — 2004. — № 3. — С. 23–34.
2. Вайсберг Л. А., Коровников А. Н., Трофимов В. А. Модернизация технологических циклов грохочения на основе инновационного оборудования (к 100-летию института «Механобр») // Горный журнал. — 2017. — № 1. — С. 11–17. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.02.
3. Markauskas D., Kruggel-Emden H. Coupled DEMSPH simulations of wet continuous screening // Advanced Powder Technology. 2019, vol. 30, no. 12, pp. 2997–3009.
4. Вайсберг Л. А., Балдаева Т. М., Иванов К. С., Отрощенко А. А. Эффективность грохочения при круговых и прямолинейных колебаниях // Обогащение руд. — 2016. — № 1. — С. 3–9. DOI: 10.17580/or.2016.01.01.
5. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Испытания двухстадийной схемы измельчения титаномагнетитовой руды // Обогащение руд. — 2018. — № 2. — С. 13–18. DOI: 10.17580/or.2018.02.03.
6. Palaniandy S., Halomoan R., Ishikawa H. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit – The multi-component approach // Minerals Engineering. 2019, vol. 133, pp. 10–18. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.019.
7. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Применение тонкого гидравлического грохочения для стадийного выделения концентрата // Обогащение руд. — 2021. — № 1. — С. 8–14. DOI: 10.17580/or.2021.01.02.
8. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Стадийное извлечение железного концентрата с помощью барабанного сепаратора с модифицированной ванной // Обогащение руд. — 2016. — № 4. — С. 10–15. DOI: 10.17580/or.2016.04.02.
9. Немыкин С. А., Копанев С. Н., Мезенцева Е. В., Окунев С. М. Производство железорудного концентрата с повышенной долей полезного компонента // Горный журнал. — 2017. — № 5. — С. 27–31. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.05.
10. Исмагилов Р. И., Козуб А. В., Гридасов И. Н., Шелепов Э. В. Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов на примере АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» // Горная промышленность. — 2020. — № 4. — С. 98–103. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.
11. Опалев А. С., Хохуля М. С., Фомин А. В., Карпов И. В. Создание инновационных технологий производства высококачественного железосодержащего концентрата на предприятиях северо-запада России // Горный журнал. — 2019. — № 6. — С. 56–60. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.17.
12. Поваров А. Н. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. — М.: Недра, 1978. — 232 с.
13. Botha S., le Roux J. D., Craig I. K. Hybrid non-linear model predictive control of a run-of-mine ore grinding mill circuit // Minerals Engineering. 2018, vol. 123, pp. 49–62. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.04.016.
14. Эрдэнэзул Ж., Морозов В. В. Оптимизация крупности измельчения медно-молибденовых руд с использованием модельориентированных критериев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 8. — С. 176–183. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-176-183.
15. Осипова Н. В. Выбор параметров алгоритма управления загрузкой мельницы мокрого самоизмельчения железной руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10. — С. 146–156. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_146.
16. Мелехина К. А., Ананьев П. П., Плотникова А. В., Тимофеев А. С., Шестак С. А. Моделирование и оптимизация процесса рудоподготовки комплексных руд при их дезинтеграции в мельнице самоизмельчения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 95–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.

17. Campos T. M., Bueno G., Barrios G. K. P., Tavares L. M. Pressing iron ore concentrate in a pilot-scale HPGR. Part 1: Experimental results // *Minerals Engineering*. 2019, vol. 140, article 105875. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105875.

18. Campos T. M., Bueno G., Barrios G. K. P., Tavares L. M. Pressing iron ore concentrate in a pilot-scale HPGR. Part 2: Modeling and simulation // *Minerals Engineering*. 2019, vol. 140, article 105876. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105876.

19. Campos T. M., Bueno G., Rodriguez V. A., Böttcher A.-C., Kwade A., Mayerhofer F., Tavares L. M. Relationships between particle breakage characteristics and comminution response of fine iron ore concentrates // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 164, article 106818. DOI: DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106818.

20. Пелевин А. Е. Влияние магнитной флокуляции на результаты обогащения железосодержащих руд // *Обогащение руд*. – 2021. – № 4. – С. 15–20. DOI: 10.17580/or.2021.04.03. **WAS**

REFERENCES

1. Vaisberg L. A., Korovnikov A. N. Fine screening as an alternative to hydraulic classification by size. *Obogashchenie Rud*. 2004, no. 3, pp. 23–34. [In Russ].

2. Vaisberg L. A., Korovnikov A. N., Trofimov V. A. Innovative reequipment of screening circuits (to commemorate the 100th anniversary of the Mekhanobr Institute). *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 1, pp. 11–17. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.02.

3. Markauskas D., Kruggel-Emden H. Coupled DEMSPH simulations of wet continuous screening. *Advanced Powder Technology*. 2019, vol. 30, no. 12, pp. 2997–3009.

4. Vaisberg L. A., Baldaeva T. M., Ivanov K. S., Otroshchenko A. A. Screening efficiency with circular and rectilinear vibrations. *Obogashchenie Rud*. 2016, no. 1, pp. 3–9. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2016.01.01.

5. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Titanomagnetite ore two-stage grinding circuit tests. *Obogashchenie Rud*. 2018, no. 2, pp. 13–18. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2018.02.03.

6. Palaniandy S., Halomoan R., Ishikawa H. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit – The multi-component approach. *Minerals Engineering*. 2019, vol. 133, pp. 10–18. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.019.

7. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Fine hydraulic screening for staged separation of titanium-magnetite concentrate. *Obogashchenie Rud*. 2021, no. 1, pp. 8–14. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.01.02.

8. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Iron concentrate stage separation by means of drum magnetic separator with modified separating bath. *Obogashchenie Rud*. 2016, no. 4, pp. 10–15. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2016.04.02.

9. Nemykin S. A., Kopanev S. N., Mezentseva E. V., Okunev S. M. Iron concentrate production with the increased content of useful component. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 5, pp. 27–31. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.05.

10. Ismagilov R. I., Kozub A. V., Gridasov I. N., Shelepov E. V. Advanced solutions applied by JSC Andrei Varichev Mikhailovsky GOK to improve ferruginous quartzite concentration performance. *Russian Mining Industry*. 2020, no. 4, pp. 98–103. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.

11. Opalev A. S., Khokhulya M. S., Fomin A. V., Karpov I. V. Creation of innovative technologies for production of high-quality iron concentrate production in the North West of Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 6, pp. 56–60. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.17.

12. Povarov A. N. *Gidrotsyklony na obogatitel'nykh fabrikakh* [Hydrocyclones at dressing mills], Moscow, Nedra, 1978. 232 p.

13. Botha S., le Roux J. D., Craig I. K. Hybrid non-linear model predictive control of a run-of-mine ore grinding mill circuit. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 123, pp. 49–62. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.04.016.

14. Erdenesul J., Morozov V. V. Optimizing copper–molybdenum ore milling coarseness using model-oriented criteria. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 8, pp. 176–183. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-176-183.

15. Osipova N. V. Selecting parameters of feed control algorithm for wet autogenous mill for grinding iron ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 146–156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_146.

16. Melekhina K. A., Ananyev P. P., Plotnikova A. V., Timofeev A. S., Shestak S. A. Modeling and optimization of complex ore pretreatment by disintegration in autogenous mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 95–105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.

17. Campos T. M., Bueno G., Barrios G. K. P., Tavares L. M. Pressing iron ore concentrate in a pilot-scale HPGR. Part 1: Experimental results. *Minerals Engineering.* 2019, vol. 140, article 105875. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105875.

18. Campos T. M., Bueno G., Barrios G. K. P., Tavares L. M. Pressing iron ore concentrate in a pilot-scale HPGR. Part 2: Modeling and simulation. *Minerals Engineering.* 2019, vol. 140, article 105876. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105876.

19. Campos T. M., Bueno G., Rodriguez V. A., Böttcher A.-C., Kwade A., Mayerhofer F., Tavares L. M. Relationships between particle breakage characteristics and comminution response of fine iron ore concentrates. *Minerals Engineering.* 2021, vol. 164, article 106818. DOI: DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106818.

20. Pelevin A. E. Effects of magnetic flocculation on iron-bearing ore concentration. *Obogashchenie Rud.* 2021, no. 4, pp. 15–20. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.04.03.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пелевин Алексей Евгеньевич — д-р техн. наук, доцент, профессор, e-mail: a-pelevin@yandex.ru, Уральский государственный горный университет, ORCID ID: 0000-0001-6063-3932,

Сытых Александр Николаевич — начальник управления контроля продукции, ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат (ЕВРАЗ КГОК).

Для контактов: Пелевин А.Е., e-mail: a-pelevin@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.E. Pelevin, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor, e-mail: a-pelevin@yandex.ru, Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia, ORCID ID: 0000-0001-6063-3932,

N.A. Sytykh, Head of Quality Control Department, EVRAZ Kachkanar Mining and Processing Plant, 624351, Kachkanar, Russia.

Corresponding author: A.E. Pelevin, e-mail: a-pelevin@yandex.ru.

Получена редакцией 01.11.2021; получена после рецензии 01.03.2022; принята к печати 10.04.2022.

Received by the editors 01.11.2021; received after the review 01.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.

