Особенности процесса классификации в гидроциклонах при измельчении титаномагнетитовой руды

Пелевин А. Е.^{1*}, Сытых Н. А.²

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

² ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат, г. Качканар Свердловской обл., Россия

*e-mail: a-pelevin@yandex.ru

Реферат

Цель работы – оценка особенностей использования гидроциклонов в замкнутом цикле второй стадии измельчения для условий обогатительной фабрики Качканарского ГОКа.

Методология. Испытания выполнены в промышленных условиях при различной производительности по твердому двух гидроциклонов ГЦ-710.

Результаты промышленных испытаний и их обсуждение. Повышение в питании гидроциклона содержания твердого и класса –71 мкм приводит к увеличению выхода слива. Снижение в питании гидроциклона содержания твердого и повышение содержания класса –71 мкм приводит к увеличению содержания класса –71 мкм в сливе. При увеличении содержания твердого в питании гидроциклонов повышается извлечение всех классов крупности в слив гидроциклона. При этом эффективность классификации по классу –71 мкм снижается.

Значения содержаний железа в сливе и песках гидроциклона. В классифицирующем гидроциклоне происходит частичное разделение по плотности, что проявляется в различных значениях содержаний железа в сливе и песках. При повышенной плотности пульпы содержание железа в сливе выше, чем содержание железа в песках. При низкой плотности исходной пульпы слив беднее по железу, чем пески, что связано с попаданием мелких частиц титаномагнетита в пески.

Выводы. На показатели разделения по крупности в гидроциклоне существенное влияние оказывают содержание твердого и содержание класса –71 мкм в питании. Недостатком гидроциклона является частичное разделение по плотности (по железу), что приводит к переизмельчению титаномагнетита в замкнутом цикле измельчения и к повышению его потерь в последующих операциях мокрой магнитной сепарации. К технологиям, позволяющим уменьшить переизмельчение титаномагнетита в замкнутом цикле измельчения, относятся: использование систем автоматизированного управления процессом классификации в гидроциклоне, применение гидравлических грохотов вместо гидроциклонов и стадийное выделение концентрата.

Ключевые слова: гидроциклон; измельчение; слив; пески; содержание твердого; содержание класса крупности –0,071 мкм; содержание железа.

Введение. Гидроциклон является основным классифицирующим аппаратом, применяемым в замкнутом цикле измельчения [1, 2]. Эффективность классификации в гидроциклонах определяет производительность мельниц и общую эффективность работы замкнутого цикла измельчения [3]. Теория процесса разделения в гидроциклонах и практика их промышленного применения достаточно изучены [1, 2, 4].

Результаты классификации по крупности в гидроциклоне вполне прогнозируемы и зависят от режимов его работы и характеристик исходного питания. Возможность стабилизации и изменения режимов работы гидроциклонов в зависимости от качественно-количественных характеристик исходного продукта

позволяет оптимизировать работу замкнутого цикла измельчения. Это является одним из достоинств гидроциклонов, предопределивших их широкое применение. Для оптимизации показателей измельчения руд разработаны автоматизированные системы, управляющие режимами работы гидроциклонов [5–9].

Целью выполненных исследований и промышленных испытаний явилась оценка особенностей использования гидроциклонов в замкнутом цикле второй стадии измельчения для условий обогатительной фабрики Качканарского ГОКа.

Методика исследований и использованное оборудование. Схема переработки титаномагнетитовой руды на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа включает сухую магнитную сепарацию мелкодробленой руды, три стадии измельчения и четыре стадии мокрой магнитной сепарации (ММС). Первая стадия измельчения осуществляется в стержневых мельницах. Гидроциклоны применяются во второй и третьей стадиях измельчения.

Рис. 1. Схема второй стадии измельчения титаномагнетитовой руды
Fig. 1. The circuit of the second stage of titanium magnetite ore grinding

Схема замкнутого цикла измельчения второй стадии приведена на рис. 1. Особенностью схемы является применение внутри замкнутого цикла обогатительной операции (второй стадии мокрой магнитной сепарации). Крупность питания второй стадии измельчения составляет $-3+0$ мм.

На технологических секциях по производству концентрата для агломерации во второй стадии измельчения применяются одна мельница МШЦ–3600 × 4500 и два гидроциклона ГЦ-710 с размером питающего отверстия 70 × 200 мм и диаметрами сливного и пескового отверстий 200 и 70–75 мм соответственно. Исходная пульпа подается в гидроциклоны с помощью насоса 8Гр-8, имеющего максимальную объемную производительность 400 м³/ч. Система автоматизации насос–гидроциклон не применяется. Число оборотов двигателя насоса не регулируется. Регулировка уровня пульпы в зумпфе осуществляется ручным способом.

Испытания выполнены на технологических секциях по производству концентрата для агломерации. В процессе испытаний размеры питающего, сливного и пескового отверстий не изменялись, давление пульпы на входе в гидроциклон не измерялось. Исследовано влияние на процесс классификации (на выход слива и на содержание в нем класса –71 мкм) двух факторов – содержания твердого и содержания класса –71 мкм в питании гидроциклонов. Значения факторов специ-

Таблица 1. Средние результаты классификации в двух гидроциклонах ГЦ-710 при использовании различных схем обогащения на сечениях по производству концентрата для агломерации (данные 2007–2008 гг.)
Table 1. Average results of classification in two GTs-710 hydrocyclones under various processing flowsheets in the sections of concentrate production for agglomeration (data from 2007–2008)

№ схемы	Содержание Fe в руде, %	Исходное питание			Слив			Пески	
		Производительность, т/ч	Содержание, %		Выход, %	Содержание, %		Содержание, %	
			-71 мкм	твердого		-71 мкм	твердого	-71 мкм	Fe
1	15,0	205,48	22,88	38,80	22,36	60,80	17,58	48,50	11,96
2	15,7	269,46	20,61	51,23	22,49	53,58	23,67	43,28	11,04
3	16,1	311,79	15,08	57,18	19,89	47,14	25,77	43,08	7,12
4	15,6	490,61	22,57	60,07	39,14	39,80	44,05	44,78	11,48
									42,98

Таблица 2. Средние результаты классификации в гидроциклонах ГЦ-710 и 650CVX во второй стадии измельчения на сечении по производству концентрата для окомкования (данные 2007 г.)
Table 2. Average results of classification in hydrocyclones GTs-710 and 650CVX at the second stage of grinding in the sections of concentrate production for pelletization (data from 2007)

Питание		Слив			Пески		Эффективность классификации, %
Содержание, %		Выход, %	Содержание, %		Содержание, %		
-71 мкм	твердого		-71 мкм	твердого	-71 мкм	твердого	
Гидроциклонная установка «ГЦ-710 – 8ГР-8»							
24,0	43,8	21,92	58,2	18,0	14,4	73,3	41,10
Автоматизированная гидроциклонная установка «Cavex – Watan»							
21,0	40,8	24,65	58,9	16,2	8,6	81,1	56,32

Гидроциклонная установка «ГЦ-710 – 8ГР-8»

Автоматизированная гидроциклонная установка «Cavex – Watan»

ально не изменялись, а фиксировались путем анализа отобранных продуктов классификации при применении четырех различных схем обогащения титано-магнетитовой руды.

Результаты промышленных испытаний и их обсуждение. Средние показатели классификации в двух гидроциклонах ГЦ-710 приведены в табл. 1. Производительность технологических по исходной руде для всех схем была максимальной, ограниченной производительностью стержневой мельницы.

Номера схем в табл. 1 приведены в порядке возрастания нагрузки на вторую стадию измельчения. При этом нагрузка на операцию классификации также увеличивалась. Это сопровождалось повышением содержания твердого в питании вследствие уменьшения количества воды, подаваемой в зумпф для исключения перелива пульпы из зумпфа насоса 8Гр-8. Расчетный объем пульпы составил 311–376 м³/ч для схем № 1–3.

Схема № 1 – стандартная схема обогащения. Особенность испытаний состояла в переработке на обогатительной фабрике руды с пониженным содержанием Fe (15 %). Это привело к снижению количества (выхода) магнитного продукта операции ММС-I, который является питанием второй стадии измельчения. Поэтому схема № 1 характеризуется пониженной нагрузкой на вторую стадию измельчения и на гидроциклоны. Питание гидроциклонов характеризуется пониженным содержанием твердого (38,8 %) и повышенным содержанием класса –71 мкм (22,88 %). В результате этого при классификации получен самый тонкий слив (60,8 % класса –71 мкм) с пониженным, по сравнению с другими схемами, содержанием твердого (17,58 %). Выход слива в среднем составил 22,36 %.

Схема № 2 – стандартная схема обогащения. Содержание Fe в руде (15,7 %) было плановым. Поэтому результаты классификации в гидроциклонах ГЦ-710 во второй стадии измельчения (при содержании класса –71 мкм и твердого в питании 20,61 и 51,23 % соответственно) можно считать базовыми для обогатительной фабрики Качканарского ГОКа. Получен слив с содержаниями класса –71 мкм и твердого, равными 53,58 % и 23,67 % соответственно. Выход слива в среднем составил 22,49 %.

Схема № 3 – схема обогащения с применением в операции ММС-I сепараторов с повышенной индукцией магнитного поля [10]. Кроме этого, при испытаниях этой схемы на обогатительную фабрику поступала руда с повышенным содержанием Fe (16,1 %). Это привело к увеличению количества (выхода) магнитного продукта операции ММС-I, который является питанием второй стадии измельчения. Поэтому схема № 3 характеризуется повышенной нагрузкой на вторую стадию измельчения и на гидроциклоны, повышенным содержанием твердого (57,18 %) и пониженным содержанием класса –71 мкм в питании гидроциклонов (15,08 %). В результате этого в сливе снизилось содержание класса –71 мкм (до 47,14 %) и увеличилось содержание твердого (до 25,77 %). Выход слива (19,89 %) самый низкий среди сравниваемых схем, что связано с пониженным содержанием класса –71 мкм в питании гидроциклонов. При этом получены пески с самым низким содержанием класса –71 мкм (7,12 %).

Схема № 4 – схема обогащения с двумя стадиями измельчения. Содержание Fe в руде (15,6 %) при испытаниях было плановым.

Схема измельчения второй стадии включала в себя последовательные поверочную классификацию в гидроциклонах и контрольную классификацию на грохоте (использованы сита с размером ячейки 0,15 мм), а также операции ММС-II и ММС-III, на которые поступали сливы соответственно мельницы и гидроциклонов ГЦ-710. Пески гидроциклонов и надрешетный продукт грохота поступали в мельницу. При испытаниях суммарная циркулирующая нагрузка резко воз-

росла, что привело к перегрузке всего технологического оборудования. Это сопровождалось переливами зумпфов, приемных коробов и ванн магнитных сепараторов. Поэтому испытания были остановлены (схема в настоящее время не применяется) [11].

Рис. 2. Закономерности процесса классификации в гидроциклонах ГЦ-710:
 а – зависимость выхода слива от содержания твердого в питании: 1 – схемы № 1, 2, 4 ($\alpha^{-71} = 20,57\text{--}22,88\%$); 2 – схема № 3 ($\alpha^{-71} = 15,08\%$); б – зависимость выхода слива от содержания класса -71 мкм в питании: 1 – схемы № 1–3 ($\alpha_{\text{тв}} = 38,80\text{--}57,18\%$); 2 – схема № 4 ($\alpha_{\text{тв}} = 60,07\%$); в – зависимость содержания твердого в сливе от содержания твердого в питании: 1 – схемы № 1–3 ($\alpha_{\text{тв}} = 38,80\text{--}57,18\%$); 2 – схема № 4 ($\alpha_{\text{тв}} = 60,07\%$); з – зависимость содержания класса -71 мкм в сливе от содержания твердого в питании (схемы № 1–4)

Fig. 2. Regularities of the process of classification in GTs-710 hydrocyclones:
 а – dependence between the discharge output and the content of solid in the feed: 1 – schemes no. 1, 2, 4 ($\alpha^{-71} = 20.57\text{--}22.88\%$); 2 – scheme no. 3 ($\alpha^{-71} = 15.08\%$); б – dependence between the discharge output and the content of $-71\text{ }\mu\text{m}$ class in the feed: 1 – schemes no. 1–3 ($\alpha_s = 38.80\text{--}57.18\%$); 2 – scheme no. 4 ($\alpha_s = 60.07\%$); в – dependence between the content of solid in the discharge and in the feed: 1 – schemes no. 1–3 ($\alpha_s = 38.80\text{--}57.18\%$); 2 – scheme no. 4 ($\alpha_s = 60.07\%$); д – dependence between the content of $-71\text{ }\mu\text{m}$ class in the discharge and the content of solid in the feed (schemes no. 1–4)

Результаты классификации в гидроциклонах при использовании схемы № 4 можно считать предельными как по производительности (490,61 т/ч), так и по содержанию твердого в питании (60,07 %) при использовании насоса 8Гр-8.

Содержание класса -71 мкм в питании гидроциклонов (22,57 %) не снизилось. Однако слив гидроциклонов характеризуется самым низким содержанием класса

–71 мкм (39,8 %) и самым высоким содержанием твердого (44,05 %). Выход слива (39,14 %) максимальный среди сравниваемых схем. Это объясняется перегрузкой песковых насадок гидроциклонов (3,38 т/(см² · ч)) и повышенным содержанием твердого в питании. При этом содержание класса –71 мкм в песках (11,48 %) значительно не изменилось по сравнению со стандартной схемой (табл. 1).

Выход слива и содержание в нем класса –71 мкм при использовании гидроциклонов во второй стадии измельчения описываются регрессионными моделями вида:

$$\gamma_{\text{сл}} = -30,38 + 0,59\alpha_{\text{тв}} + 1,24\alpha^{-71} \quad R = 0,72; \quad (1)$$

$$\beta^{-71} = 65,09 - 0,50\alpha_{\text{тв}} + 0,68\alpha^{-71} \quad R = 0,84, \quad (2)$$

где $\gamma_{\text{сл}}$ и β^{-71} – выход слива и содержание в нем класса –71 мкм, %; $\alpha_{\text{тв}}$ и α^{-71} – содержание твердого и класса –71 мкм в питании гидроциклона, %.

Полученные зависимости справедливы для диапазона изменения факторов: $\alpha_{\text{тв}} = 36,19\text{--}63,55$ % и $\alpha^{-71} = 14,2\text{--}25,1$ %. Величины коэффициентов корреляции говорят о наличии связи между функциями и факторами. Но максимальные ошибки предсказания при вероятности 95 % достаточно высокие ($\pm 4\text{--}5$ %), что связано с получением зависимостей в промышленных условиях при использовании различных схем измельчения и обогащения. Поэтому полученные регрессионные модели нельзя использовать для точного прогноза результатов классификации в гидроциклонах.

Однако выполненный регрессионный анализ показал, что оба фактора ($\alpha_{\text{тв}}$ и α^{-71}) с вероятностью $P > 97$ % значимо влияют на целевые функции (на выход слива и на содержание в нем класса –71 мкм). Следовательно, по знаку коэффициента фактора можно судить о виде связи между функциями и факторами. Повышение в питании гидроциклона содержания твердого и класса –71 мкм приводит к увеличению выхода слива (зависимость (1)). Снижение в питании гидроциклона содержания твердого и повышение содержания класса –71 мкм приводит к увеличению содержания класса –71 мкм в сливе (зависимость (2)).

На рис. 2 приведены зависимости, характеризующие особенности процесса классификации в гидроциклонах ГЦ-710 во второй стадии измельчения схемы обогащения титаномагнетитовой руды.

С увеличением содержания твердого в питании гидроциклонов при различных содержаниях класса –71 мкм в их питании (20,57–22,88 % и 15,08 %) произошло повышение выхода слива (рис. 2, а, зависимости 1 и 2). Увеличение содержания класса –71 мкм в питании гидроциклонов при различных содержаниях твердого в их питании (38,80–57,18 % и 60,07 %) также привело к повышению выхода слива (рис. 2, б, зависимости 1 и 2).

Уменьшение содержания твердого в питании гидроциклонов для всех испытанных схем привело к снижению содержания твердого в сливе (рис. 2, в) и, как следствие, к повышению содержания класса –71 мкм в сливе гидроциклонов (рис. 2, г).

При увеличении содержания твердого в питании гидроциклонов повышается вязкость и плотность пульпы. Это приводит к снижению эффективности разделения по крупности (уменьшается содержание класса –71 мкм в сливе) и к повышению нагрузки на песковую насадку (увеличивается выход слива). Кроме этого, при увеличении плотности исходной пульпы несколько снижается давление на входе в гидроциклон, что также приводит к получению более крупного слива при большем его выходе.

В целом, полученные экспериментальные закономерности процесса классификации измельченной титаномагнетитовой руды соответствуют общим закономерностям разделения в гидроциклонах минерального сырья в замкнутых циклах измельчения.

На рис. 3 приведены сепарационные характеристики гидроциклонов (зависимости извлечения класса крупности в слив от средней крупности класса) для схем № 1, 2 и 4.

При увеличении содержания твердого в питании гидроциклонов второй стадии измельчения повышается извлечение всех классов крупности в слив, особен-

но для схемы № 4 со средним содержанием твердого в питании 60,07 % (рис. 3). При такой высокой плотности пульпы в слив извлекается небольшое количество (4,92 %) даже класса крупности $-1,6+0,56$ мм.

Повышение извлечения всех классов крупности в слив при увеличении плотности пульпы приводит к снижению крутизны сепарационных характеристик ($tg\alpha$) гидроциклонов второй стадии измельчения (рис. 3, зависимости 1–3). При этом эффективность классификации (E^{-71}) также снижается: 48,05; 45,32; 38,6 % соответственно для схем № 1, 2 и 4.

Значения содержаний железа в сливе и песках гидроциклона.

В классифицирующем гидроциклоне происходит частичное разделение материала по плотности. Это особенно проявляется при классификации измельченных магнетитовых и титаномагнетитовых руд, рудные и

Рис. 3. Сепарационные характеристики гидроциклона ГЦ-710:

1 – схема № 1 ($\alpha_{\text{тн}} = 38,80$ %); 2 – схема № 2 ($\alpha_{\text{тн}} = 51,23$ %); 3 – схема № 4 ($\alpha_{\text{тн}} = 60,07$ %)

Fig. 3. Separation characteristics of GTs-710 hydrocyclone:

1 – scheme no. 1 ($\alpha_s = 38,80$ %); 2 – scheme no. 2 ($\alpha_s = 51,23$ %); 3 – scheme no. 4 ($\alpha_s = 60,07$ %)

породные минералы которых имеют значительные различия в плотности и измельчаемости.

При низком и стандартном содержании твердого в питании гидроциклонов (схема № 1 и схема № 2) содержание железа в песках выше, чем содержание железа в сливе. При повышенном содержании твердого в питании (схемы № 3 и № 4) содержание железа в сливе, наоборот, больше содержания железа в песках (табл. 1). Эта закономерность для отдельных опытов при использовании гидроциклонов ГЦ-710 во второй стадии измельчения приведена на рис. 4.

При снижении содержания твердого в питании гидроциклонов уменьшается вязкость и плотность пульпы, что приводит к повышению эффективности процесса разделения по крупности (содержание класса -71 мкм в сливе увеличивается, рис. 2, з). Но, с другой стороны, это приводит и к повышению эффективности процесса разделения по плотности (содержание Fe в песках увеличивается). Так, короткоконусные гидроциклоны, применяемые для разделения по плотности, работают на весьма разбавленной пульпе, по сравнению с классифицирующими гидроциклонами [12]. Поэтому мелкие раскрытые частицы титаномагнетита, которые должны перейти в слив гидроциклона (в готовый продукт стадии измельчения), частично переходят в пески гидроциклона за счет более высокой плот-

ности по сравнению с породными минералами. Пески гидроциклона поступают в мельницу, что приводит к переизмельчению раскрытых зерен титаномагнетита и к повышению потерь титаномагнетита в последующих операциях мокрой магнитной сепарации.

Повышение содержания твердого в питании гидроциклонов ГЦ-710 приводит к увеличению содержания железа в сливе, что хорошо с точки зрения разделения по железу. Но при этом происходит снижение эффективности разделения по крупности (уменьшается содержание класса -71 мкм в сливе, рис. 2, з).

Частичное разделение по плотности является недостатком применения гидроциклонов в замкнутых циклах измельчения. Этот недостаток в основном проявляется при классификации магнетитовых и титаномагнетитовых промпродуктов, которые характеризуются повышенным содержанием тяжелых минералов.

Рис. 4. Зависимость разницы между содержаниями железа в сливе и песках от содержания твердого в питании гидроциклонов

Fig. 4. Dependence of the difference between the content of iron in the discharge and sand on the content of solid in the feed of hydrocyclones

Повышение эффективности работы замкнутых циклов измельчения титаномагнетитовых (магнетитовых) руд.

Применение автоматизированных систем насос–гидроциклон, позволяющих стабилизировать требуемые показатели классификации за счет управления режимами работы гидроциклонов [5–9].

Результаты сравнительных испытаний ГЦ-710 без системы автоматизации и гидроциклонной установки «Cavex – Warman» с гидроциклоном 650CVX и с системой автоматизации на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа приведены в табл. 2.

Применение автоматизированного управления процессом классификации в гидроциклоне 650CVX позволило увеличить эффективность классификации во второй стадии измельчения на 15,22 % (с 41,1 до 56,32 %). Произошло значительное снижение содержания класса $-0,071$ мкм в песках (с 14,4 до 8,6 %). Это позволяет предполагать, что количество раскрытых зерен титаномагнетита в песках, поступающих в мельницу, также снизилось.

Использование тонкого грохочения в качестве альтернативы классификации по крупности в гидроциклонах [11, 13–16]. В гидравлическом вибрационном

грохоте, так же как и в гидроциклонах, происходит частичное разделение по плотности. Но, в отличие от гидроциклонов, содержание железа в подрешетном продукте всегда будет выше, чем в надрешетном продукте. Это связано с переходом в подрешетный продукт частиц преимущественно с повышенной плотностью. При обогащении титаномагнетитовой руды грохот, с теоретической точки зрения, является идеальным аппаратом для использования в замкнутом цикле измельчения, позволяющим снизить переизмельчение титаномагнетита и повысить технологические показатели схемы обогащения.

Однако грохот на данном уровне развития техники и технологии не сможет полностью заменить гидроциклон в замкнутом цикле измельчения. Это связано с его низкой удельной производительностью на единицу площади и объема производственного здания и с высокими затратами на приобретение и эксплуатацию грохотов.

Применение технологий со стадийным выделением концентрата. Технологии со стадийным выделением концентрата позволяют выделить из питания замкнутого цикла измельчения часть раскрытых зерен титаномагнетита, чтобы не допустить их переизмельчения. Такие технологии применимы с использованием методов разделения по крупности, плотности и по магнитным свойствам [17], они предполагают применение гидроциклонов в последующей стадии измельчения.

Все перечисленные методы повышения эффективности работы замкнутых циклов измельчения титаномагнетитовых (магнетитовых) руд связаны с изменением затрат на обогащение. Поэтому их применяют на основании технико-экономического сравнения вариантов.

В настоящее время гидроциклон является основным аппаратом для гидравлической классификации по крупности в замкнутом цикле измельчения. Это связано с простой конструкцией гидроциклона и прогнозируемостью результатов его работы. В гидроциклоне практически при любых условиях будет происходить разделение по крупности.

Выводы. На показатели разделения по крупности в гидроциклоне существенное влияние оказывают содержание твердого и содержание класса -71 мкм в питании.

В классифицирующем гидроциклоне происходит частичное разделение по плотности, что проявляется в различных значениях содержаний железа в сливе и песках. При повышенной плотности пульпы содержание железа в сливе выше, чем содержание железа в песках. При низкой плотности исходной пульпы слив беднее по железу, чем пески, что связано с попаданием части мелких частиц титаномагнетита в пески.

Недостатком гидроциклона является частичное разделение по плотности (по железу), что приводит к переизмельчению титаномагнетита в замкнутом цикле измельчения и к повышению его потерь в последующих операциях мокрой магнитной сепарации. К технологиям, позволяющим уменьшить переизмельчение титаномагнетита в замкнутом цикле измельчения, относятся: использование систем автоматизированного управления процессом классификации в гидроциклоне, применение гидравлических грохотов вместо гидроциклонов и стадийное выделение концентрата.

Полученные результаты справедливы при классификации в гидроциклонах измельченных титаномагнетитовых промпродуктов, содержащих титаномагнетит и породные минералы с повышенной плотностью (до 3500 кг/м^3).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поваров А. Н. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М.: Недра, 1978. 232 с.
2. Шохин В. Н., Лопатин А. Г. Гравитационные методы обогащения. М.: Недра, 1993. 350 с.
3. Измельчение. Энергетика и технология / Г. Г. Пивняк [и др.]. М.: Руда и Металлы, 2007. 296 с.
4. Vakamalla Teja Reddy, Mangadoddy Narasimha. Detail flow field and performance analysis of inclined hydrocyclones by CFD and experiments // XXVIII IMPC Proceedings. Quebec, Canada, 2016. Paper ID: 1091.
5. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / В. В. Морозов [и др.]. М.: Руда и Металлы, 2013. 512 с.
6. Львов В. В., Александрова Т. Н. Система автоматического управления процессом классификации в гидроциклонах // Горный журнал. 2016. № 5. С. 94–96.
7. 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. P. 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.016>
8. Le Roux J. D., Olivier L. E., Naidoo M. A., Padhi R., Craig I. K. Throughput and product quality control for a grinding mill circuit using non-linear MPC // Journal of Process Control. 2016. Vol. 42. P. 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.04.007>
9. Botha S., Craig I. K., Le Roux J. D. Switching cyclones to increase product particle size range for ore milling circuits // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48. Iss. 17. P. 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.084>
10. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Применение сепараторов с повышенной индукцией магнитного поля при обогащении титаномagnetитовой руды // Обогащение руд. 2020. № 2. С. 15–20. DOI: 10.17580/or.2020.02.03
11. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Испытания двухстадиальной схемы измельчения титаномagnetитовой руды // Обогащение руд. 2018. № 2. С. 13–18. DOI: 10.17580/or.2020.02.05
12. Васильев А. М., Кусков В. Б. Особенности процесса концентрации тонкозернистых материалов в короткоконусном гидроциклоне // Обогащение руд. 2018. № 2. С. 30–34. DOI: 10.17580/or.2018.02.06
13. Вайсберг Л. А., Коровников А. Н. Тонкое грохочение как альтернатива гидравлической классификации по крупности // Обогащение руд. 2004. № 3. С. 23–34.
14. Mwale A. N., Mainza A. N., Bepswa P. A., Simukanga S., Masinja J. Model for fine wet screening // XXVIII IMPC Proceedings. Quebec, Canada, 2016. Paper ID: 568.
15. Markauskas Darius, Kruggel-Emden Harald. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening // Advanced Powder Technology. 2019. Vol. 30. Iss. 12. P. 2997–3009.
16. Palaniandy Samayamutthirian, Halomoan Rinto, Ishikawa Hidemasa. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit – The multi-component approach // Minerals Engineering. 2019. Vol. 133. P. 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.019>
17. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Стадиальное извлечение железного концентрата с помощью барабанного сепаратора с модифицированной ванной // Обогащение руд. 2016. № 4. С. 10–15. DOI: 10.17580/or.2016.04.02

Поступила в редакцию 5 октября 2020 года

Сведения об авторах:

Пелевин Алексей Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: a-pelevin@yandex.ru

Сытых Николай Александрович – начальник управления контроля продукции «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат». E-mail: gmfi.opi@ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-74-84

The features of classification in hydrocyclones in the course of titanium magnetite ore grinding

Aleksei E. Pelevin¹, Nikolai A. Sytykh²

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

² EVRAZ Kachkanarsky Ore Mining and Processing Plant, Kachkanar, Sverdlovsk region, Russia.

Abstract

Research aim is to assess the use of hydrocyclones in the closed circuit of the second stage of grinding for the conditions of EVRAZ KGOK dressing mill.

Methodology. Industrial tests were carried out under various solid phase capacities of two hydrocyclones GTs-710.

Industrial testing results and their discussion. Increase in the content of solid and –71 µm class in the feed of the hydrocyclone results in discharge output increase. Decrease in the content of solid and increase in the content of –71 µm class result in the increased content of –71 µm class in the discharge. When increasing the content of solid in the feed of the hydrocyclone, the extraction of all size classes into the discharge of the hydrocyclone increases. At the same time the efficiency of classification by –71 µm class reduces.

Iron content values in hydrocyclone discharge and sand. The classifying hydrocyclone partially separates by density resulting in different content values of iron in discharge and sand. Under pulp high density, the content of iron in the discharge is higher than that of iron in sand. Under low density of feed pulp, there is less iron in the discharge, compared to that in sand; that is due to small particles of titanium magnetite entering the sand.

Summary. The indicators of separation by size in hydrocyclone are significantly affected by the content of solid and $-71 \mu\text{m}$ class in the feed. The drawback of the hydrocyclone is partial separation by density (in iron) which results in overgrinding of titanium magnetite in the closed circuit of grinding and higher losses in subsequent procedures of wet magnetic separation. The technologies which make it possible to reduce overgrinding of titanium magnetite in the closed circuit of grinding are as follows: automatic control system for classification in the hydrocyclone, the use of hydraulic screens instead of hydrocyclones, and multi-stage dressing.

Key words: hydrocyclone; grinding; discharge; sand; solid content; $-71 \mu\text{m}$ grain-size class content; iron content.

REFERENCES

1. Povarov A. N. *Hydrocyclones at dressing mills*. Moscow: Nedra Publishing; 1978. (In Russ.)
2. Shokhin V. N., Lopatin A. G. *Gravity dressing*. Moscow: Nedra Publishing; 1993. (In Russ.)
3. Pivniak G. G. et al. *Grinding. Energy and technology*. Moscow: Ruda i Metally Publishing; 2007. (In Russ.)
4. Vakamalla Teja Reddy, Mangadoddy Narasimha. Detail flow field and performance analysis of inclined hydrocyclones by CFD and experiments. In: *XXVIII IMPC Proceedings*. Quebec, Canada, 2016. Paper ID: 1091.
5. Morozov V. V. et al. *Developing and using automatic control systems for the processes of mineral dressing*. Moscow: Ruda i Metally Publishing; 2013. (In Russ.)
6. Lvov V. V., Aleksandrova T. N. The system of automatic control over the process of classification in hydrocyclones. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2016; 5: 94–96. (In Russ.)
7. 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; 123: 49–62. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.016>
8. Le Roux J. D., Olivier L. E., Naidoo M. A., Padhi R., Craig I. K. Throughput and product quality control for a grinding mill circuit using non-linear MPC. *Journal of Process Control*. 2016; 42: 35–50. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.04.007>
9. Botha S., Craig I. K., Le Roux J. D. Switching cyclones to increase product particle size range for ore milling circuits. *IFAC-PapersOnLine*. 2015; 48 (17): 92–97. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.084>
10. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Increased magnetic field induction separators in titanium magnetite ore processing. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2020; 2: 15–20. (In Russ.) Available from: DOI: 10.17580/or.2020.02.03.
11. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Titanomagnetite ore two-stage grinding circuit tests. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2018; 2: 13–18. (In Russ.) Available from: DOI: 10.17580/or.2020.02.05.
12. Vasiliev A. M., Kuskov V. B. Specific features of the concentration process for fine-grained materials in a short-cone hydrocyclone. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2018; 2: 30–34. (In Russ.) Available from: DOI: 10.17580/or.2018.02.06.
13. Vaisberg L. A., Korovnikov A. N. Fine screening as an alternative to hydraulic size classification. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2004; 3: 23–34. (In Russ.)
14. Mwale A. N., Mainza A. N., Bepswa P. A., Simukanga S., Masinja J. Model for fine wet screening. In: *XXVIII IMPC Proceedings*. Quebec, Canada, 2016. Paper ID: 568.
15. Markauskas Darius, Kruggel-Emden Harald. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening. *Advanced Powder Technology*. 2019; 30 (12): 2997–3009.
16. Palaniandy Samayamuththirian, Halomoan Rinto, Ishikawa Hidemasa. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit – The multi-component approach. *Minerals Engineering*. 2019; 133: 10–18. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.019>
17. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Multi-stage extraction of iron concentrate with the help of a drum separator with a modified separating bath. *Obogashchenie rud = Mineral Processing*. 2016; 4: 10–15. Available from: DOI: 10.17580/or.2016.04.02.

Received 5 October 2020

Information about authors:

Aleksei E. Pelevin – DSc (Engineering), Associate Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: a-pelevin@yandex.ru
Nikolai A. Sytykh – Chief of Production Control Department, EVRAZ Kachkanar Ore Mining and Processing Plant. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru

Для цитирования: Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Особенности процесса классификации в гидроциклонах при измельчении титаномagnetитовой руды // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 74–84. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-74-84

For citation: Pelevin A. E., Sytykh N. A. The features of classification in hydrocyclones in the course of titanium magnetite ore grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 74–84 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-74-84