

Усовершенствованное интегрированное измельчение и классификация с eHPCC™

Л.Роупер^{a*}, В.Борисенко^b, М.Дэниел^c

^a*JTG Consultants Pty Ltd, c/- 147 ул.Фром,, Аделаида, Южная Австралия, 5000, Австралия*

^b*JTG Kazakhstan LLC, ул.Масанчи 98В, кв.17, Алматы, 050022, Казахстан*

^c*CMD Consulting Pty Ltd, P.O. Box 714, Кенмор, Квинсланд, 4069, Австралия*

*адрес для корреспонденции: linden.roper@e-hpcc.com

РЕЗЮМЕ

Эксцентриковая центробежная установка измельчения высокого давления (eHPCC) - это новая установка измельчения, которая обеспечивает достижение желаемого целевого размера измельчения частиц в один шаг. Механизм измельчения частиц аналогичен измельчению валками (HPGR) и высокоинтенсивному истиранию с воздушной классификацией. eHPCC измельчает крупнокусковую руду в продукт P80 меньше натурального размера зерна. Установка работает как в замкнутом, так и в открытом цикле. Зона измельчения сухая и свободная от стальных измельчающих шаров. В настоящем документе представлены доказательства того, что eHPCC-2, способна к селективному и преимущественному высвобождению целевых минералов. Недавно были завершены пробные тестовые испытания на смешанной подземной кварцевой золотой руде. Исходным материалом для испытания eHPCC-2 являлся надрешетный продукт бутары мельницы ПСИ (низкосортная галea). eHPCC-2 работала в открытом цикле с воздушным-псевдооживлением во вращающейся камере измельчения, классифицируя частицы по конечной скорости витания частиц продукта, на которую влияют одновременно размеры и минеральный состав частиц. Есть возможность для проведения будущих промышленных исследований, нацеленных на использование eHPCC в качестве передовой интегрированной технологии измельчения и классификации.

Ключевые слова: высокое давление, высокая интенсивность, сжатие, истирание, измельчение, классификация.

1. Введение

Традиционные ступенчатые дробилки, шаровые мельницы и схемы классификации, возможно, достигли пределов эффективности и производительности. По сути, они не менялись десятилетиями.

Новая технология - Эксцентриковая центробежная установка измельчения высокого давления (еНРСС), изобретенная в 2013 году, в настоящее время проходит пилотные испытания на действующем золотом руднике в Казахстане.

еНРСС прошла через апробацию концепции (с 2013 по 2015 год) затем двукратное масштабирование, включая несколько итераций проектирования и разработки (с 2016 по 2019 год).

еНРСС способна удовлетворить требованиям последующих процессов переработки за счет селективного и преимущественного обогащения и классификации минералов.

На рисунках 1 и 2 представлены схематические изображения еНРСС и ее измельчающей камеры. Руда подвергается самоизмельчению в зоне высокого давления, создаваемой синхронно и эксцентрично вращающимися компонентами (примечание: оси вращения параллельны и статичны во время работы). Частицы минералов (или металла) и пустой породы покидают камеру измельчения после того, как они подвергаются полностью интегрированному псевдоожигению и (первичной) классификации.

Частицы выходят (потенциально) значительно различающимися размером, формой и плотностью (в зависимости от разницы в твердости минерала и пустой породы). Эти частицы продукта перетекают в зону вторичной классификации (той же машины), разделяя частицы в зависимости от их размера и/или плотности. еНРСС сочетает в себе низкоскоростной разрыв слоя частиц, аналогичный технологии вертикальных валковых мельниц (VRM) и валков высокого давления (HPGR), с полностью интегрированными традиционными технологиями псевдоожигения и воздушной классификации (Roper and Daniel 2016). (Роупер и Дэниел, 2016 г.) определяют и представляют философию дизайна еНРСС. Крупные частицы остаются внутри камеры измельчения, пока не уменьшатся до заданного размера помола.

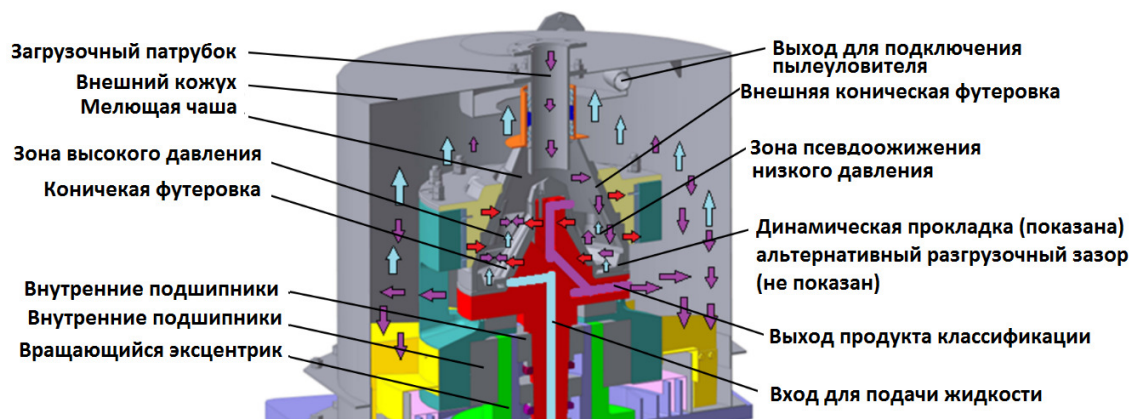


Рис.1. еНРСС в разрезе (Роупер и Дэниел 2016)



Рис.2. eNPCS вид разгрузочной щели в разрезе в эксцентриковой позиции

(Роупер и Дэниел 2016)

В данной статье представлены научно значимые доказательства селективного высвобождения минералов в результате экспериментальных исследований, проведенных на потоке надрешетного продукта бутары мельницы ПСИ. Галька имеет твердую гранитную структуру (рис. 4), которая содержит темную и светлую структуру кварца, а также частицы свободного золота.

Селективное высвобождение минералов дает возможность:

- 1) повысить извлечение флотацией и минимизировать или избежать затрат на обработку шламов (например, флокулянтов) за счет минимального образования ультратонких частиц размером менее 70 мкм; а также
- 2) избежать излишнего потребления энергии, потребляемой в обычных схемах измельчения, которые не избирательно уменьшают размер частиц минерала или пустой породы.

Предполагается, что объединенная энергия для измельчения и классификации с подачей воздуха крупного высвобожденного золота и частиц пустой породы равна или меньше ожидаемой по традиционной теории измельчения (например, Моррелла и Бонда), которая определяет удельную энергию, необходимую для достижения определенного целевого размера измельчения, при котором происходит высвобождение ценных минералов, представляющих интерес.

Прямое сравнение размеров продукта обычного измельчения и eNPCS может не иметь значения из-за преимущественного (избирательного) высвобождения минералов. Энергоэффективность eNPCS в лабораторном масштабе сравнивалась с обычным измельчением, и было выявлено, что она на 15% более энергоэффективна (Роупер, 2015). При сравнении учитывалось преимущество, возникающее из-за исключения внутренней энергии, связанной со стальными мелющими шарами. Меньшие по размеру установки имеют более высокое энергопотребление без нагрузки и снижения эффективности двигателя, что должно улучшиться при масштабировании eNPCS.

Преимущества полномасштабных установок eNPCS со временем займут место традиционных циклов и помогут инженерному воплощению технологии в экономически жизнеспособную схему измельчения.

2. Справочная информация

Повторяющийся синусоидальный цикл сжатия/псевдооживления слоя частиц внутри камеры измельчения eHPCC, показанный на рисунке 3, обеспечивает предпочтительное измельчение более мягких видов руды (желтые) при сжатии более твердыми частицами (черные). Во время декомпрессии и псевдооживления (вращающегося) цикла более мягкие частицы (теперь меньшего размера) вымываются из псевдооживленного слоя частиц против центробежных и гравитационных сил технологической жидкостью (средой). Более твердые (более крупные) частицы под влиянием центробежного ускорения концентрируются на внешнем диаметре и нижних пределах конической вращающейся камеры измельчения, продолжая работать друг с другом во время каждой последующей фазы сжатия. Различные варианты настройки машины и системы технологической жидкости позволяют оптимизировать избирательное выделение и (первичную) классификацию. Концентрация более твердых и крупных частиц (аналогично обычной мелющей среде) увеличивает скорость измельчения (т. е. площадь поверхности множества мелких более твердых частиц); наблюдалось на этапе подтверждения концепции (2015 г. ; с использованием мелющих шаров).

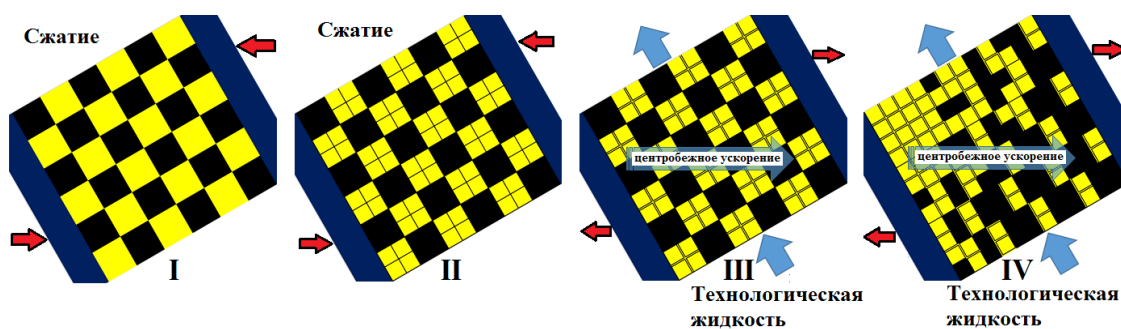


Рис.3. eHPCC цикл разрушения и высвобождения слоя частиц
(Роупер и Дэниел 2016)

3. Эксперименты

3.1. *Загружаемый материал – Надрешетный продукт бутары мельницы ПСИ, месторождение Акбакай.*

На золотом руднике Акбакай в качестве исходного материала для проведения опытно-промышленных испытаний использовался надрешетный продукт бутары мельницы ПСИ. Этот материал представлял собой смесь кварц-золото-жильных руд различных подземных источников. Максимальный размер был 37,5 мм, а у Р80 18 мм. На рис. 4 показан образец «гранитной» текстурированной гальки. Показатель работы стержневой мельницы RW_i для этой руды составил 18,0 кВтч / т. АО АК «Алтыналмас» (АА), Казахстан, владелец золотого рудника Акбакай, предоставило вышеуказанное сырье и технические данные.



Рис.4. Надрешетный продукт бутары мельницы ПСИ, Акбакай

3.2. Условия и процедуры эксперимента

На рисунке 5 показана технологическая схема (PFD), используемая для генерации грубого и тонкого потоков продуктов из eHPCSS-2. Два потока продукта, грубый и мелкий, поступают на общий конвейер продукта. Пробы из грубого и мелкого потоков отбирались отдельно. Разделение по массе между двумя потоками определялось с помощью процедуры, определенной в разделе 3.2.1 ниже как «Процедура соотношения массы продукта».

Подачу в eHPCSS-2 осуществляли с помощью ленточного весового дозатора, калибровали в соответствии с инструкциями производителя по эксплуатации и техническому обслуживанию и перекрестно проверяли с помощью взвешенного образца с ленты длиной 1 м и скорости ленты.

Нижеперечисленные системные переменные оставались постоянными во время всех тестов:

- 1) поток воздуха для псевдооживления / классификации - номинально 200 м³/ч (4 м³/мин) при 75 кПа (изб.);
- 2) расход воздуха в рукавной камере (не измеряется) - от 2000 до 4000 м³/ч в зависимости от сопротивления; а также
- 3) целевая потребляемая мощность eHPCSS-2 номинально 36 кВт (механическая).

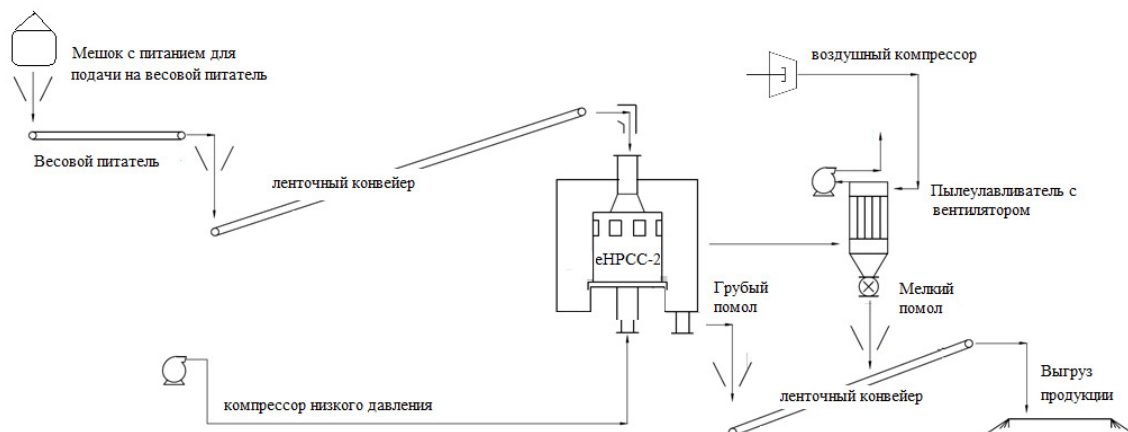


Рис.5. eNPCC-2 опытный образец, технологическая схема

На практике потребляемая мощность eNPCC-2, измеряемая в амперах, составляла от 65 до 85 А. Максимальная мощность главного привода eNPCC-2 при полной нагрузке составляла 108 А (установленная мощность 55кВт); Таким образом, система работала и стабилизировалась на уровне ~ 70% от полной нагрузки (~ 38,5кВт).

Системные переменные eNPCC-2, которые были менялись при проведении испытаний:

- 1) разгрузочный зазор камеры измельчения (1, 2 и 3 мм);
- 2) низкая частота вращения вала 94, 105 и 115 оборотов в минуту (об/мин); а также
- 3) положения эксцентрикового смещения 90 °, 120 ° и 180 ° (т.е. эксцентриситет 10 мм, 15 мм и 20 мм).

АО АК «Алтыналмас» (АА), предоставившее образец породы, также анализировали пробы, и представили данные о их продукте измельчения мельницы ПСИ и распределении фракций золота (Au) и предоставило эти данные для базового сравнения с продуктом eNPCC-2.

3.2.1. Процедура соотношения массы продукта (руды)

Процедура определения массового соотношения потоков крупного и мелкого продукта (руды) была следующей:

Для каждого рабочего испытания и после того, как система eNPCC-2 достигла установившегося рабочего состояния, грубые и мелкие потоки отбирались поперечно потоку, затем

- 1) поворотный клапан на пылеуловителе отключался для удержания пыли в пылеуловителе; а также
- 2) прямоугольный бункер для образцов сыпучих материалов, устанавливался для сбора крупного продукта с разгрузочного конвейера.

После сбора приемлемого количества грубого (и мелкого) продукта (-ов) вся система намеренно останавливалась.

Грубый продукт, захваченный в прямоугольном бункере для образцов (с конвейера продукта), систематически переносился в пластиковые ведра, которые взвешивались и суммировались (нетто).

Затем мелкий продукт высвобождался из рукавного фильтра (после пульсации всех фильтровальных мешков) через поворотный клапан на работающий конвейер продукта, который выгружался в уже пустой прямоугольный стальной бункер для сыпучих материалов, перемещался в пластиковые ведра, взвешивался и суммировался (нетто).

Массовое соотношение каждого потока определяли с использованием измеренных массовых соотношений (грубый/мелкий) относительно скорости подачи весового дозатора (т/ч).

Используя это массовое соотношение грубого и мелкозернистого потоков, было вычислено процентное содержание руды от общего количества руды в сырье для каждой соответствующей фракции крупности грубого и тонкого потоков.

3.2.2. Процедура относительного содержания Au

Процедура, используемая для определения относительного количества Au в каждом размере фракции каждого из потоков крупного и мелкого продукта (руды), была следующей:

Результаты лабораторных анализов, предоставленные АА, показали содержание общего Au (соответствующего образца) в каждой из его размерных фракций. АА рассчитал это на основе результатов анализа, измеренного в содержании золота (г/т) (Au) в каждой фракции размера частиц. Это (фракционное) содержание, умноженное на массу руды в каждой соответствующей размерной фракции, а затем разделенное на сумму всех размерных фракций для каждой пробы, привело к процентной массе общего Au в каждой размерной фракции для каждой пробы.

Используя эти данные, а также массовое соотношение грубых и мелких потоков, было рассчитано процентное содержание Au от общего Au в сырье, относящееся к каждой фракции соответствующего размера образцов крупных и мелких потоков.

4. Результаты и рассуждения

4.1. Гранулометрический состав руды и золота

Ниже приводится информация о четырнадцати (14) испытаниях, в каждом из которых образцы грубого и тонкого продукта были проанализированы в лаборатории на массу руды и процентное содержание золота в каждой фракции частиц по отношению к общему сырью. Кроме того, для прямого сравнения, продукт измельчения мельницы ПСИ включен и показан рядом с агрегированным продуктом eНРСС-2 (грубые и мелкие потоки, сложенные вместе в соответствии с массовым соотношением). В таблицах данных используется условное форматирование для отображения относительных величин (цветовая шкала в пределах дробных размеров: зеленый = обедненный; белый = средний; красный = концентрированный).

Таблица 1 (руда) показывает, что потоки объединенного продукта eНРСС-2 по сравнению с продуктом мельницы ПСИ, как правило, имели значительно большее массовое соотношение во фракциях мелких частиц. Дискретная классификация по размеру и отделение мелких частиц от крупных становится очевидным при сравнении массового отношения «мелкодисперсного потока» к «крупному потоку» для каждой размерной фракции.

Таблица 1 (руда) и таблица 2 (Au) показывают пороговые явления при фракции номинального размера 212–250 мкм и более выраженные в тестах с минимальным разгрузочным зазором eНРСС-2 (большее измельчение). Это субъективно указывает на преобладание натурального размера минеральных зерен (на основе твердости/достаточности). «Естественный размер минеральных зерен» не измерялся и не проверялся независимыми организациями.

Обращает на себя внимание массовый расход, показанный в таблице 1. Массовый расход eНРСС-2 ограничен установленной мощностью и геометрией внутренних проходов, тогда как коммерческая версия eНРСС-2.2 с таким же геометрическим размером, как ожидается, достигнет в три-четыре раза больший массовый поток.

Таблица 2 показывает концентрацию Au во фракции - 75 мкм (ячейки, заштрихованные светло-красным цветом) и относится к потоку мелкодисперсного продукта (пыль). Субъективно это будет означать, что размер зерен золота очень мал и/или имеет плоскую форму блинов, способствующую переносу в воздушном потоке классификатора. Кроме того, это может указывать на то, что частицы золота достаточно малы, чтобы «пропитать» более крупные частицы минерала-носителя. Эти утверждения требуют исследования и подтверждения. В таблице 2 показано остаточное золото в составе других фракций большего размера (в крупном потоке). Недостаточно информации, чтобы определить статус высвобождения этого более крупного золотосодержащего минерала. Образец продукта мельницы ПСИ показывает золото, спорадически диспергированное по фракциям всех размеров, без значительной концентрации в более мелких фракциях, несмотря на схожий общий P80 (см.Рис.7). Это показывает разницу в характеристиках высвобождения между обычной мельницей полусамоизмельчения и eНРСС-2.

Данные испытаний № 4, № 8 и № 17 на рисунках 6 и 7 показывают совокупное процентное содержание золота между каждой фракцией размера частиц относительно эквивалентного совокупного процентного содержания руды как для мелкозернистого, так и для крупного потока (рис. 6), а также совокупное содержание этих потоков (мелкие + крупные; рис.7). Единственной переменной был разгрузочный зазор eНРСС-2 (1 мм, 2 мм и 3 мм). Другие параметры машины (скорость и эксцентрик) были одинаковыми для каждого из этих тестов.

Таблица 1: Процент руды в каждой фракции крупности для каждого образца

Тест №	1	2	3	4	5	6	7	8	15	16	17	18	19	20	Подрешетный продукт бутары мельницы ПСИ	
Зазор (мм)	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3		3
Эксцентрик (°)	90	90	120	180	90	90	120	180	90	120	180	90	120	180		
Скорость (об.в мин)	94	105	105	105	94	105	105	105	105	105	105	115	115	115		
Масса потока (т.в час)	0,8	1,0	1,1	1,2	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	2,1	2,3	1,8	2,1	2,4		
- грубый помол (т.в час)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6	0,8	0,9	0,9	1,3	1,5	1,1	1,3	1,6		
- тонкий помол (т.в час)	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8		
% руды в каждом размере фракций для каждого теста - восстановлено в соответствии с соотношением массового расхода грубых и тонких помолов	10 мм	0.1%	0.0%	0.1%	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%	0.1%	0.4%	1.1%	0.2%	0.9%	1.0%	0.9%	0.0%
	6,3 мм	0.1%	0.5%	0.1%	0.1%	0.0%	0.2%	0.2%	0.3%	0.7%	1.5%	1.5%	1.6%	1.5%	3.0%	1.0%
	4,75 мм	0.1%	0.4%	0.1%	0.1%	0.6%	0.7%	0.9%	1.5%	2.6%	4.1%	4.6%	3.6%	4.5%	5.1%	1.5%
	2,8 мм	0.8%	2.5%	2.8%	3.7%	8.7%	6.5%	8.1%	11.2%	9.3%	11.8%	14.4%	12.7%	14.3%	14.4%	4.6%
	2 мм	1.6%	0.5%	5.4%	6.5%	8.0%	6.3%	7.5%	8.1%	5.0%	6.1%	8.0%	7.1%	8.6%	7.8%	4.4%
	1,5 мм	3.0%	7.0%	6.1%	7.0%	7.0%	6.2%	7.3%	8.6%	5.5%	5.8%	7.3%	7.8%	8.2%	8.5%	7.6%
	850 мкм	3.5%	7.7%	6.6%	6.9%	6.1%	5.6%	6.6%	7.5%	5.5%	6.3%	7.8%	7.7%	8.5%	7.9%	13.4%
	500 мкм	4.9%	10.3%	8.0%	8.2%	7.3%	6.6%	7.4%	8.1%	6.4%	7.6%	8.8%	8.8%	9.4%	8.9%	14.2%
	355 мкм	5.5%	18.1%	8.2%	7.1%	5.5%	4.9%	4.8%	5.2%	5.4%	8.4%	6.2%	7.4%	0.8%	6.1%	10.8%
	250 мкм	8.5%	10.8%	17.3%	17.5%	6.5%	7.0%	5.3%	5.3%	10.3%	11.8%	9.2%	9.6%	9.1%	6.6%	12.6%
	212 мкм	10.4%	3.1%	1.6%	1.9%	2.8%	2.5%	2.3%	2.4%	1.4%	1.3%	2.0%	2.1%	2.5%	3.0%	6.5%
	150 мкм	16.9%	2.6%	2.6%	5.9%	6.1%	4.7%	9.3%	5.7%	8.7%	6.2%	4.6%	4.4%	7.4%	7.1%	8.5%
	106 мкм	2.5%	2.4%	5.3%	2.7%	5.1%	6.2%	6.0%	4.5%	2.5%	2.8%	4.4%	5.0%	2.2%	2.6%	6.2%
	75 мкм	3.6%	2.1%	5.9%	2.3%	4.5%	4.1%	1.9%	6.6%	1.0%	1.0%	2.0%	1.6%	1.5%	1.4%	5.5%
	<75 мкм	38.6%	32.0%	29.9%	29.6%	31.6%	38.1%	31.9%	24.9%	35.2%	24.2%	19.0%	19.6%	20.4%	16.7%	3.2%
Сумма :	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
% руды в каждом размере фракции - учет массового соотношения грубого и тонкого помола	Грубый помол	10 мм	0.1%	0.0%	0.1%	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%	0.1%	0.4%	1.1%	0.2%	0.9%	1.0%	0.9%
		6,3 мм	0.1%	0.5%	0.1%	0.1%	0.0%	0.2%	0.2%	0.3%	0.7%	1.5%	1.5%	1.6%	1.5%	3.0%
		4,75 мм	0.1%	0.4%	0.1%	0.1%	0.6%	0.7%	0.9%	1.5%	2.6%	4.1%	4.6%	3.6%	4.5%	5.1%
		2,8 мм	0.8%	2.5%	2.8%	3.7%	8.7%	6.5%	8.1%	11.2%	9.3%	11.8%	14.4%	12.7%	14.3%	14.4%
		2 мм	1.6%	0.5%	5.4%	6.5%	8.0%	6.3%	7.5%	8.1%	5.0%	6.1%	8.0%	7.1%	8.6%	7.8%
		1,5 мм	3.0%	7.0%	6.1%	7.0%	7.0%	6.2%	7.3%	8.6%	5.5%	5.8%	7.3%	7.8%	8.2%	8.5%
		850 мкм	3.5%	7.7%	6.6%	6.9%	6.1%	5.6%	6.6%	7.5%	5.5%	6.3%	7.8%	7.7%	8.5%	7.9%
		500 мкм	4.9%	10.3%	8.0%	8.2%	7.3%	6.6%	7.4%	8.1%	6.4%	7.6%	8.8%	8.8%	9.4%	8.9%
		355 мкм	5.5%	18.1%	8.2%	7.1%	5.5%	4.9%	4.8%	5.2%	5.4%	8.4%	6.2%	7.4%	0.8%	6.1%
		250 мкм	8.5%	10.8%	17.3%	17.5%	6.5%	7.0%	5.3%	5.3%	10.3%	11.8%	9.2%	9.6%	9.1%	6.6%
		212 мкм	10.4%	3.1%	1.6%	1.9%	2.8%	2.5%	2.3%	2.4%	1.4%	1.3%	2.0%	2.1%	2.5%	3.0%
		150 мкм	15.8%	1.2%	1.4%	5.0%	4.4%	3.0%	3.5%	4.1%	3.1%	2.3%	3.4%	2.6%	4.2%	5.1%
		106 мкм	0.9%	0.8%	2.5%	1.2%	2.5%	3.3%	1.5%	2.1%	0.6%	1.5%	1.9%	1.8%	1.2%	1.4%
		75 мкм	0.8%	0.1%	0.2%	0.2%	0.3%	0.4%	0.6%	0.9%	0.5%	0.7%	0.9%	0.8%	1.0%	1.1%
		-75 мкм	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.5%	0.1%	0.2%
	Тонкий помол	150 мкм	1.2%	1.4%	1.2%	0.9%	1.7%	1.7%	5.8%	1.6%	5.6%	3.9%	1.2%	1.9%	3.2%	2.0%
		106 мкм	1.6%	1.6%	2.8%	1.5%	2.5%	2.8%	4.5%	2.3%	1.9%	1.3%	2.4%	3.3%	1.1%	1.1%
		75 мкм	2.8%	2.0%	5.7%	2.1%	4.1%	3.7%	1.3%	5.7%	0.5%	0.3%	1.0%	0.8%	0.5%	0.3%
		<75 мкм	38.6%	31.9%	29.7%	29.5%	31.4%	38.0%	31.6%	24.8%	35.2%	24.1%	18.8%	19.2%	20.2%	16.5%
Сумма:	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

Рисунки 6 и 7 типичны для всех сценариев. На рис. 6 показано обогащение тонкого потока по сравнению с истощением золота из крупного потока.

Наблюдаемое обогащение более мелких фракций всех потоков, включая продукт измельчения мельницы ПСИ, вероятно, вызвано структурой руды (тип кварцевой жилы) и преобладающими трещинами вдоль естественных трещин, которые содержат большую часть золота, высвобождаемого во время первичного разрушения. eНРСС-2, по сравнению с обычным измельчением, представленным продуктом мельницы ПСИ, выдерживает трудности, связанные с переработкой слишком большого размера загружаемого продукта мельницы ПСИ (более

твердая и обедненная золотом часть руды), демонстрирует интегрированные возможности селективного высвобождения и классификации.

Таблица 2: Процент золота в каждой фракции крупности для каждого образца

Тест №	1	2	3	4	5	6	7	8	15	16	17	18	19	20	*	
Зазор (мм)	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	*	
% Au в каждом размере фракции для каждого теста - восстановлено в соответствии с соотношением массового расхода грубых и тонких помолов	10 мм	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.5%	0.9%	0.3%	0.1%	0.7%	0.7%	0.3%	3.1%	1.8%	1.9%	0.0%
	6,3 мм	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.2%	0.3%	2.1%	0.4%	1.1%	0.3%	1.0%	1.2%	0.3%
	4,75 мм	0.0%	0.2%	0.0%	0.3%	0.1%	0.6%	0.8%	1.2%	0.7%	2.8%	5.6%	2.3%	3.5%	2.5%	0.8%
	2,8 мм	0.2%	1.6%	1.8%	2.9%	3.4%	2.2%	4.7%	9.5%	6.4%	13.7%	8.3%	8.4%	5.1%	6.1%	2.3%
	2 мм	0.2%	0.3%	2.5%	5.1%	4.1%	3.0%	9.2%	5.9%	4.0%	5.0%	4.6%	3.8%	6.0%	6.6%	5.1%
	1,5 мм	0.5%	4.1%	3.5%	4.7%	5.9%	3.5%	6.4%	8.9%	4.8%	4.8%	3.9%	5.5%	5.2%	17.5%	4.6%
	850 мкм	0.7%	7.4%	2.8%	9.5%	3.4%	3.6%	4.6%	7.2%	5.4%	5.3%	11.1%	6.1%	4.5%	10.1%	10.0%
	500 мкм	1.1%	4.2%	3.9%	5.3%	4.1%	5.3%	6.8%	7.7%	4.1%	5.0%	7.8%	8.7%	7.2%	3.4%	8.6%
	355 мкм	6.2%	15.1%	3.7%	4.2%	3.2%	4.2%	2.7%	3.3%	5.3%	5.0%	5.4%	4.7%	0.8%	3.5%	10.9%
	250 мкм	3.0%	6.2%	17.0%	9.6%	3.2%	3.8%	9.0%	3.4%	12.1%	12.6%	6.9%	6.9%	9.5%	4.4%	17.3%
	212 мкм	3.9%	2.6%	2.0%	1.4%	6.2%	5.8%	1.5%	2.1%	1.1%	0.8%	1.8%	1.4%	4.6%	2.5%	7.7%
	150 мкм	17.6%	2.9%	4.1%	5.1%	6.2%	8.1%	6.7%	4.0%	8.0%	4.7%	4.2%	6.6%	11.0%	5.1%	12.3%
	106 мкм	2.0%	3.1%	5.4%	3.4%	7.2%	10.0%	4.0%	4.8%	2.8%	3.2%	6.5%	5.4%	3.5%	3.6%	8.6%
	75 мкм	2.3%	5.1%	7.6%	7.9%	6.0%	4.7%	5.0%	8.6%	1.6%	1.8%	2.6%	2.3%	3.4%	1.5%	7.0%
	<75 мкм	62.3%	47.1%	45.6%	40.4%	46.4%	44.2%	38.2%	33.1%	40.8%	34.4%	30.0%	34.4%	32.8%	30.0%	4.4%
	Сумма :	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	% Au в каждом размере фракции - учет массового соотношения грубого и тонкого помола	10 мм	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.5%	0.9%	0.3%	0.1%	0.7%	0.7%	0.3%	3.1%	1.8%	1.9%
6,3 мм		0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.2%	0.3%	2.1%	0.4%	1.1%	0.3%	1.0%	1.2%	
4,75 мм		0.0%	0.2%	0.0%	0.3%	0.1%	0.6%	0.8%	1.2%	0.7%	2.8%	5.6%	2.3%	3.5%	2.5%	
2,8 мм		0.2%	1.6%	1.8%	2.9%	3.4%	2.2%	4.7%	9.5%	6.4%	13.7%	8.3%	8.4%	5.1%	6.1%	
2 мм		0.2%	0.3%	2.5%	5.1%	4.1%	3.0%	9.2%	5.9%	4.0%	5.0%	4.6%	3.8%	6.0%	6.6%	
1,5 мм		0.5%	4.1%	3.5%	4.7%	5.9%	3.5%	6.4%	8.9%	4.8%	4.8%	3.9%	5.5%	5.2%	17.5%	
850 мкм		0.7%	7.4%	2.8%	9.5%	3.4%	3.6%	4.6%	7.2%	5.4%	5.3%	11.1%	6.1%	4.5%	10.1%	
500 мкм		1.1%	4.2%	3.9%	5.3%	4.1%	5.3%	6.8%	7.7%	4.1%	5.0%	7.8%	8.7%	7.2%	3.4%	
355 мкм		6.2%	15.1%	3.7%	4.2%	3.2%	4.2%	2.7%	3.3%	5.3%	5.0%	5.4%	4.7%	0.8%	3.5%	
250 мкм		3.0%	6.2%	17.0%	9.6%	3.2%	3.8%	9.0%	3.4%	12.1%	12.6%	6.9%	6.9%	9.5%	4.4%	
212 мкм		3.9%	2.6%	2.0%	1.4%	6.2%	5.8%	1.5%	2.1%	1.1%	0.8%	1.8%	1.4%	4.6%	2.5%	
150 мкм		16.5%	0.9%	2.8%	3.8%	5.0%	6.5%	3.3%	2.6%	4.8%	1.9%	3.4%	4.4%	8.1%	3.5%	
106 мкм		0.9%	1.1%	3.3%	0.2%	5.6%	8.4%	1.5%	3.5%	1.4%	2.0%	3.9%	2.5%	2.3%	1.9%	
75 мкм		0.2%	0.2%	0.8%	0.5%	2.4%	2.6%	2.7%	2.6%	1.4%	1.6%	1.6%	1.5%	3.0%	1.3%	
-75 мкм		0.0%	0.2%	0.9%	0.8%	1.3%	1.4%	2.1%	1.2%	0.8%	0.5%	1.4%	2.7%	0.7%	1.1%	
150 мкм		1.1%	2.0%	1.3%	1.2%	1.2%	1.6%	3.4%	1.3%	3.3%	2.7%	0.9%	2.2%	2.9%	1.6%	
106 мкм		1.1%	2.0%	2.1%	3.2%	1.6%	1.6%	2.5%	1.4%	1.3%	1.1%	2.6%	2.9%	1.2%	1.7%	
75 мкм	2.1%	4.9%	6.9%	7.4%	3.5%	2.0%	2.3%	5.9%	0.2%	0.2%	0.9%	0.7%	0.5%	0.2%		
<75 мкм	62.3%	46.8%	44.7%	39.7%	45.1%	42.8%	36.2%	31.9%	39.9%	33.9%	28.6%	31.7%	32.1%	28.9%		
Сумма:	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		

* Подрешетный продукт бутары мельницы ПСИ

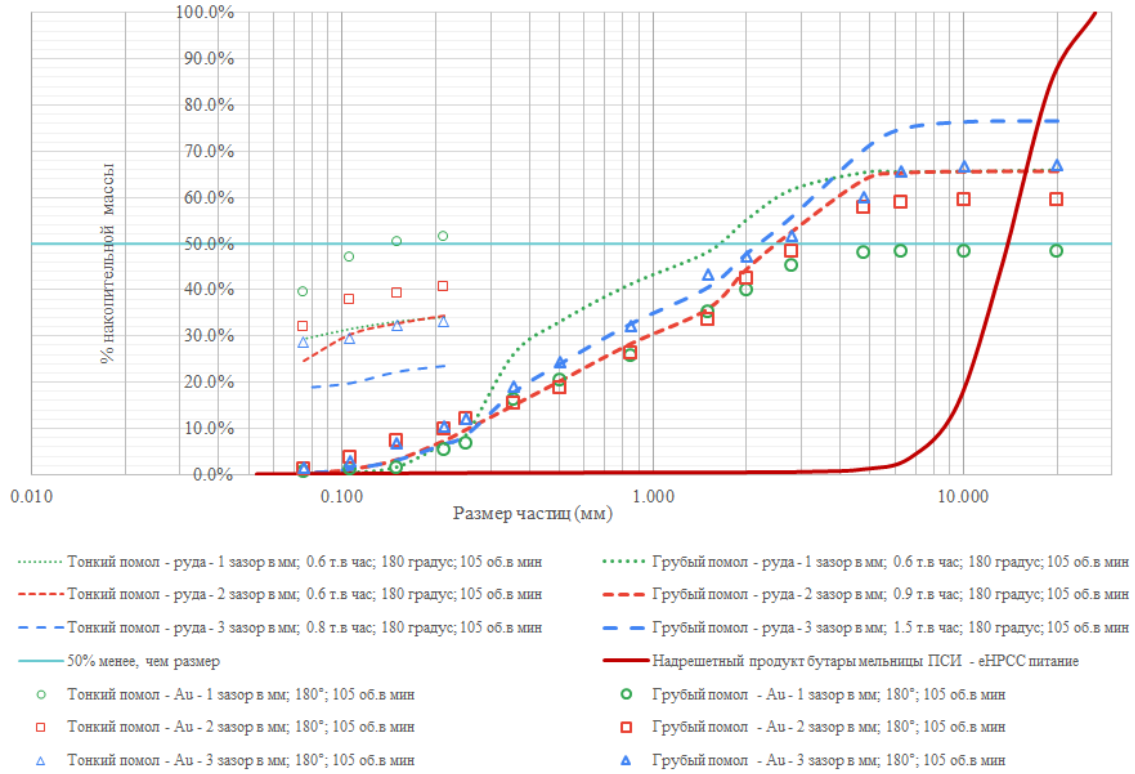


Рис.6. Гранулометрический состав руды и золота в тестах №4, №8 and №17 (мелкий и грубый потоки - по отдельности)

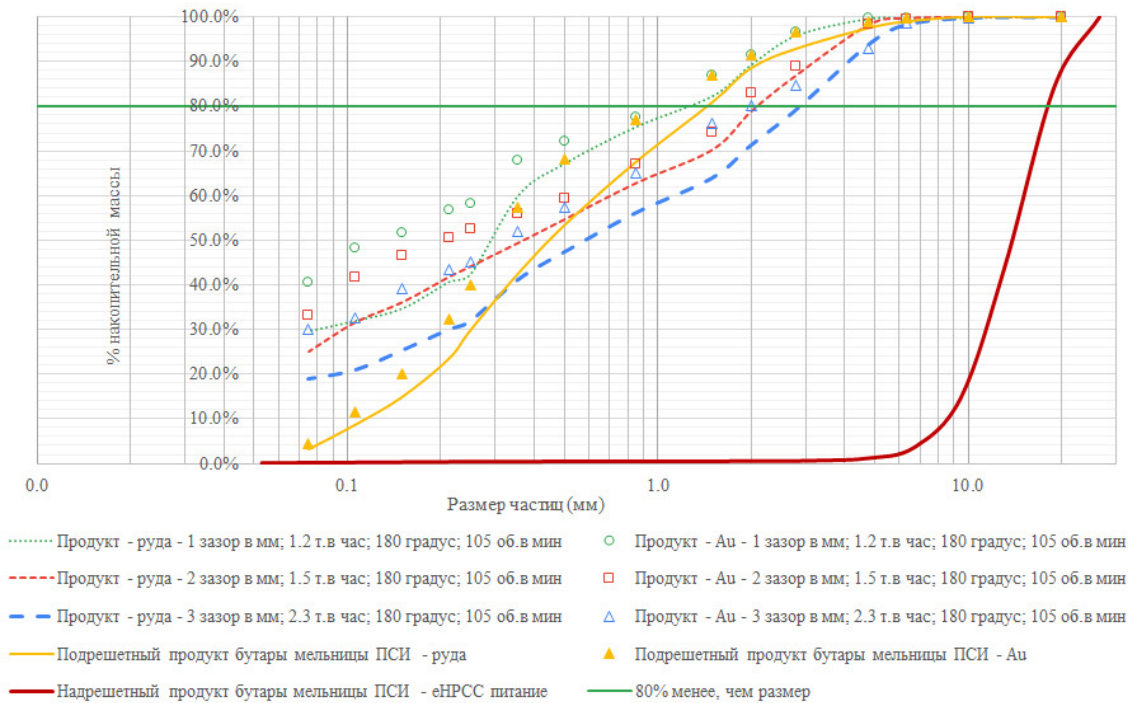


Fig.7. Агрегатный гранулометрический состав руды и золота в тестах №4, №8 and №17 и продукт мельницы ПСИ.

4.2. Научная значимость данных с использованием сценариев t-критерия

Отношение данных в Таблице 2 к Таблице 1, то есть отношение процентного содержания золота к процентному содержанию руды в каждой фракции для каждого образца/теста, было рассчитано и сведено в таблицу (не представлено здесь). Это соотношение, подвергнутое логическому статистическому анализу t-критерия, определило статистическую значимость селективного высвобождения золота и классификации, происходящей между различными сценариями. С использованием этих соотношений было проанализировано шестнадцать сценариев. В то время как целевые сценарии приводят к уровню достоверности > 95%, выводной статистический анализ t-критерия привел к следующим выводам:

4.2.1. eНРСС разгрузочный зазор (важная переменная в процессе)

Примечательно, что обогащение золотом в потоке мелкодисперсного продукта (и мелкодисперсных фракций), дополненное обеднением золота из потока крупных частиц (и фракций крупного размера), происходило более значительно при использовании зазора для выпуска продукта размером 1 мм, в отличие от зазоров 2 мм и 3 мм (см. рисунок 2 для определения размера разгрузочного зазора). Т.е. работа с небольшим разгрузочным зазором продукта привела к задержке частиц внутри камеры измельчения в течение более длительного времени, следовательно, к усилению высвобождения (с немного большим измельчением).

4.2.2. eНРСС смещение эксцентрика и скорость вращения

Эксцентриковое смещение и частота вращения не оказывают существенного влияния на высвобождение/обогащение размерных классов.

5. Заключение

В этом исследовании изучается селективное/предпочтительное высвобождение и классификация минералов в eНРСС. Из этого исследования можно сделать вывод, что селективное высвобождение золота и классификация происходят одновременно (в зоне измельчения установки eНРСС). Это очевидно по значительному обогащению фракций более мелкого размера по сравнению с обеднением золота из фракций более крупного размера, а также путем сравнения продукта eНРСС с существующим параллельным потоком, а именно с продуктом мельницы ПСИ меньшего размера (такая же исходная руда и имеющая аналогичный P80 как продукт eНРСС).

eНРСС, в отличие от традиционных технологий измельчения, предусматривает разделение продукта на два и, возможно, три потока продуктов, которые можно обрабатывать отдельно на основе индивидуальных свойств. Например, мелкодисперсный поток (указанный здесь) может быть подходящим сырьем для извлечения золота под действием силы тяжести (гравитация), и это существенно снизит затраты, связанные с последующим извлечением золота (до 60% золота, извлеченного в мелкие частицы при выходе 40%, с небольшим или нулевым завышением размера частиц).

Есть возможность для будущих промышленных исследований, нацеленных на внедрение eHPCC как передовую интегрированную технологию измельчения и классификации.

Благодарности

Мы благодарим АО «АК Алтыналмас» (АА), Казахстан, и их представителей Максут Дюссенаев, Директор департамента переработки, Джумакуль Ултаракова, Технический суперинтендант по контролю качества, и Джоэл Джеронимо, Технический суперинтендант по металлургическим проектам. Они предоставили двенадцать (12) тонн хвостов с мельниц ПСИ с золотого рудника Акбакай, а их команда (-ы) наблюдали, отбирали пробы, определяли размеры и анализировали потоки продуктов из eHPCC-2. Кроме того, АА согласилось провести пилотную эксплуатацию eHPCC-2 на своем золотом руднике Акбакай в центральном Казахстане.

Ссылки:

Роупер, Л., Дэниел, М., 2016. Презентация eHPCC международному сообществу переработчиков полезных ископаемых. В: Материалах XXVIII Международного конгресса по переработке полезных ископаемых, Квебек.

Роупер, Л., 2015. Сравнение производительности лабораторного eHPCC с обычным измельчением. В М. Эвертссон (председатель) 14-го Европейского симпозиума по измельчению и классификации (ESCC2015). Симпозиум, проведенный в Технологическом университете Чалмерса, Гетеборг, стр. 294.

Roper, L., Daniel, M., 2016. Introducing eHPCC to international mineral processing community. In: Proceedings of XXVIII International Mineral Processing Congress, Quebec.

Roper, L., 2015. A performance comparison of laboratory-scale eHPCC against conventional comminution. In M. Evertsson (Chair), 14th European Symposium on Comminution and Classification (ESCC2015). Symposium conducted at Chalmers University of Technology, Gothenburg, pp. 294.