

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ В ЦИКЛЕ РУДНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД

Бурдакова Е.А.^{1,2}, Брагин В.И.^{1,2}, Усманова Н.Ф.^{2,1}, Вашлаев А.И.^{2,1}, Лесникова Л.С.³
Дьяченко Л.Е.¹, Фертиков А.И.⁴

¹Сибирский Федеральный Университет, пр. Свободный, 79, 660041, Красноярск, Россия,

²ИХХТ СО РАН, Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
ул. Академгородок, 50 стр.24, 660036, г. Красноярск, Россия,

³ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Норильск, Россия

⁴R&D Центр Норильского никеля, пр. Свободный, 83А, 660041, Красноярск, Россия

E-mail:kate-groo@yandex.ru

Представлены результаты исследований рудной гали, сформировавшейся в мельницы полусамоизмельчения при переработке медно-никелевых руд на Талнахской обогатительной фабрике. Основной объем рудной гали представлен в классах минус 80 плюс 40 мм и минус 40 плюс 20 мм. Тесты по рентгенорадиометрической сепарации на материале рудной гали показали возможность получения обогащенного продукта данным методом и хвостов сепарации. Определены прочностные свойства концентрата рентгенорадиометрической сепарации, индекс измельчаемости Бонда. Представлены результаты флотационных исследований, проведенных на концентрате рентгенорадиометрической сепарации.

Ключевые слова: *вкрапленные медно-никелевые руды, самоизмельчение, рудная галля, рентгенорадиометрическая сортировка, контрастность руды, флотация.*

ВВЕДЕНИЕ

Процессы сокращения крупности являются наиболее энергоемкими среди процессов первичной переработки руд. По различным оценкам, в зависимости от свойств исходной руды, в цикле измельчения тратится от 40 до 65 % от общего энергопотребления при обогащении [1, 2,3, 4]. На большинстве крупных обогатительных фабрик мира, перерабатывающих руды цветных металлов, в первой стадии измельчения установлены мельницы самоизмельчения и полусамоизмельчения (AG,SAG). Эффективность их работы зависит от стабильности физико-механических характеристик исходного сырья, соотношения крупных и мелких фракций в питании, количества исходного и образующегося в процессе измельчения материала промежуточной крупности. В зависимости от физико-механических свойств перерабатываемой руды, при самоизмельчении может формироваться от 10 до 30% (от объема исходной руды) класса критической крупности (рудной гали), который склонен накапливаться в барабане, снижая производительность мельницы. В современных схемах самоизмельчения решение этой проблемы достигается рациональной добавкой шаровой загрузки (до 10% от объема мельницы), либо выводом рудной гали из мельницы и додробливанием ее в дробилке мелкого дробления. Дробленый материал возвращается в питание мельниц, либо направляется на вторую стадию измельчения в шаровой мельнице, что позволяет перераспределить нагрузку между стадиями. В мировой практике обогащения есть примеры использования концентрации рудной гали мельниц самоизмельчения методом радиометрической сортировки. Авторы в работах [2, 5] экономически обосновывают эффективность применения метода радиометрической сортировки в узле самоизмельчения для увеличения пропускной способности мельниц, повышения технологических показателей обогащения.

На медно-никелевых рудах Норильского узла, в разное время проводились исследования направленные на интенсификацию процессов обогащения с использованием энергетических воздействий [6], совершенствовались реагентные режимы, с целью

снижения потерь металлов платиновой группы с хвостами флотационного обогащения [7, 8].

Исходное содержание меди и никеля в исходной руде влияет на количество и качество получаемых концентратов [9, 10]. В настоящее время на Талнахской обогатительной фабрике (ТОФ) перерабатывают шихту, состоящую из богатой руды рудника «Скалистый»; богатой, медистой и вкрапленной руды рудника «Октябрьский», богатой руды рудника «Таймырский». Типы руд, входящие в состав шихты отличаются вариативностью технологических свойств и прочностных характеристик, однако вовлечение их в переработку связано с необходимостью обеспечения плановой загрузки фабрики. Добавка в питание вкрапленных руд «Октябрьского» рудника (~ 5% от шихты) способствует периодическому накоплению критического класса в крупности $-80+10$ мм в мельнице самоизмельчения. Помимо этого, различия в свойствах исходной шихты приводит к повышенному ошламование, переизмельчению руд других типов – богатых медистых, что сказывается на дальнейшем флотационном процессе.

Для удаления в голове технологической схемы ТОФ обедненных кусковых фракций, обладающих повышенной крепостью, принято решение исследовать возможность предварительной концентрации рудной гали методом рентгенометрической сепарации (РРС). Выделение крупнокусковых хвостов в операциях рудоподготовки способствует, как правило, повышению производительности фабрики и снижению потребления электроэнергии. Помимо определения ожидаемых показателей сортировки, в ходе исследований важно оценить отличия технологических свойств получаемого черного концентрата от свойств исходной руды. На основании результатов исследований станет возможным сделать вывод о целесообразности сортировки, додробления рудной гали и возврате ее в технологический процесс.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

При опробовании технологического процесса Талнахской обогатительной фабрики, была взята проба рудной гали из разгрузки мельницы самоизмельчения, с целью изучения ее физико-механических и технологических свойств. Материал класса критической крупности отбирался с ленточного конвейера, осуществляющего его возврат в мельницу (рис.1).



Рисунок 1 – Схема рудоподготовки 2 пускового комплекса Талнахской обогатительной фабрики

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Комплекс исследований проведен на кафедре обогащения СФУ и в R&D центре Норильского никеля в г.Красноярске. Исследования методом рентгенорадиометрической сортировки (PPC) осуществляли в R&D центре, с использованием лабораторного сепаратора РСК-Л-01.В качестве метода разделения использован рентгенофлуоресцентный, по характеристическому излучению меди и никеля. В качестве признака был выбран составной показатель, учитывающий содержание меди и никеля в кусках.

На кафедре обогащения СФУ проведены тесты по определению индекса измельчаемости (по методике Ф. Бонда) рудной гали, исследована кинетика измельчения рудной гали для дальнейших флотационных исследований. Флотационные тесты выполнены в механической флотомашине «Механобр» с объемом камеры 0,75 л, содержание твердого в питании флотации ~ 30%.

Определение содержания основных элементов (Cu, Ni, S, Fe) в рудной галле и продуктах флотационных опытов проводили рентгенофлуоресцентным методом в аналитической лаборатории R&D Центра на мобильном комплексе MobilabX-5000. Результаты определений выборочно контролировались независимой лабораторией ООО "Стюарт Геокемикл энд Эссей" различными методами. Рентгенофазовый анализ (РФА) выполнен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (излучение $CuK\alpha$, шаг сканирования 0.02 град, время накопления в точке 1 с). Расчет и расшифровка дифрактограмм осуществлены по стандартной методике с использованием картотеки эталонных порошковых спектров *JCPDS*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

В исследуемой рудной гале, на долю классов крупнее 80 мм, приходится всего 5% от общей массы (табл.1). Основное количество материала сосредоточено в крупности - 80+20 мм.

Таблица 1 - Гранулометрический состав рудной гали

Класс крупности	+80 мм	-80+40 мм	-40+20 мм	-20+10 мм	Итого
Выход, %	5	56	23	16	100

Подготовка пробы к радиометрической сепарации и последующей флотации осуществлялась согласно схеме, представленной на рисунке 2.

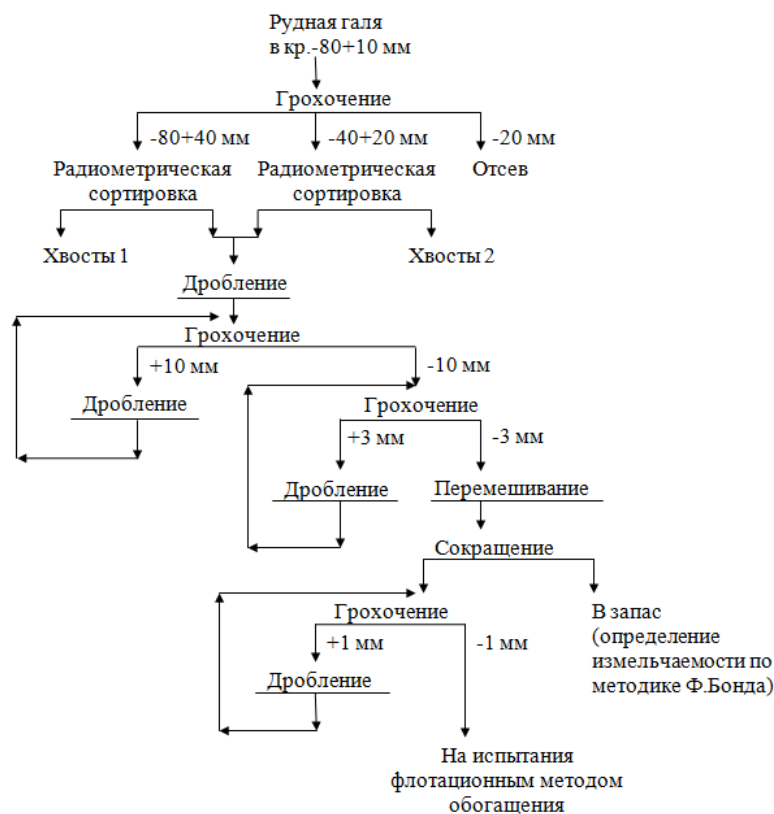
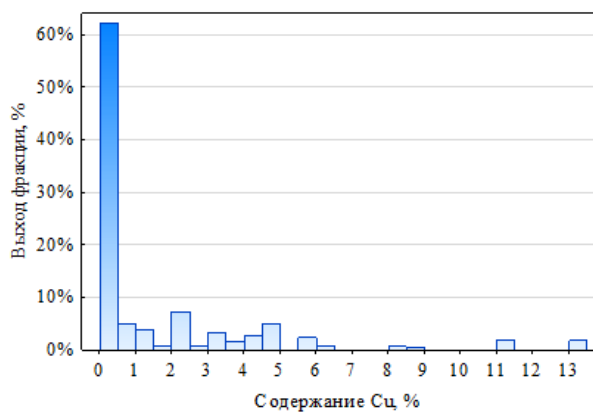


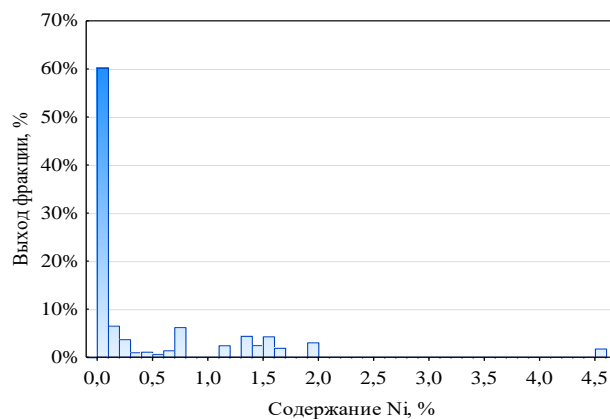
Рисунок 2 - Схема разделки пробы рудной галли

Для оценки контрастности минерального сырья, определяющей результаты сортировки, разработаны различные методы. Наиболее известной является методика, предложенная В.А. Мокроусовым [11], соответствующий показатель контрастности изменяется от 0 (неконтрастное сырье) до 2 (для особо контрастных).

В ходе исследования контрастности было изучено распределение металлов в каждом из сортируемых классов крупности рудной галли. Установлено, что распределение ценных компонентов в классах крупности -80+40 мм и -40+20 мм сходное: наблюдается преобладание самой бедной фракции с содержанием меди менее 0,5% и никеля менее 0,1%, при выходе фракции около 60%. Бедная фракция представлена пустой породой и убогой вкрапленной рудой. В более богатых фракциях, представленных, в основном, обломками вкрапленных руд, выделяется мода с относительно низким содержанием никеля 1-2% и широким диапазоном вариации содержания меди от 1% до 10-15%, характерным для медистых руд. Встречаются единичные куски с содержанием никеля 3-4,5% и меди 3-5%, представленные богатой рудой. Распределение содержания металлов представлено на рисунках 3, 4.



а



б

Рисунок 3 – Распределение содержаний а) меди; б) никеля в рудной гале в классе крупности -80+40 мм

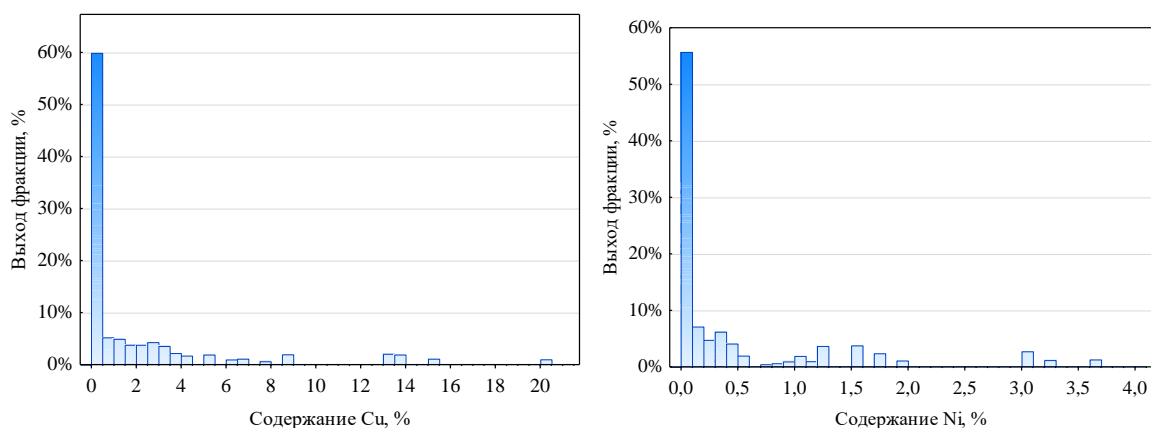


Рисунок 4 – Распределение содержаний а) меди; б) никеля в рудной гале в классе крупности -40+20 мм

Проведенные нами исследования показали, что рудная галля, образующаяся в процессе самоизмельчения на Талнахской ОФ, является, по классификации В.А. Мокроусова, высококонтрастной ($1,2 < M < 1,5$). В классе -80+40 мм показатель контрастности составил 1,26 по меди и по никелю, в классе -40+20 мм показатель контрастности составил 1,25 по меди, 1,23 по никелю.

Рентгенорадиометрической сортировке на лабораторной установке подвергали руднуюгалю в двух сортируемых классах: -80+40 мм, -40+20 мм. Для расчета сепарационной характеристики аппарата от каждого класса была отобрана проба объемом 50 кусков и 130 кусков соответственно. Куски нумеровались, далее измерялась интенсивность рентгеновского излучения, и вычислялось значение аналитического параметра для каждого куска. После этого назначалась граница разделения сепаратора, равная по меди $N_{Cu}=0,08$ усл.ед., по никелю $N_{Ni}=0,08$ усл.ед. Граница разделения выбиралась из условия получения максимального количества отвальных хвостов с содержанием металлов не выше, чем в хвостах коллективной флотацииТалнахской ОФ. Отсев в крупности -20+10 мм радиометрической сепарации не подвергали, учитывая низкую эффективность метода в такой крупности, а также то, что имеется возможность направить его в мельницу 2-ой стадии измельчения (см. рисунок 1).

Проведенные испытания на лабораторном сепараторе показали, что высокая контрастность рудной гали позволяет вывести из технологического процесса в хвостовую фракцию, методом РРС, практически половину материала, тем самым увеличив пропускную способность мельницы самоизмельчения (табл.2).

Таблица 2 Результаты рентгенорадиометрической сортировки рудной гали

Продукт	Выход, %		Содержание, %		Извлечение, %			
			Cu	Ni	Cu	Cu	Ni	Ni
	сквозной	от операции			сквозное	от операции	сквозное	от операции
Кл.-80+40 мм								
Концентрат	28	46	2,57	0,86	56,0	94,3	53,9	87,6
Хвосты	33	54	0,13	0,11	3,4	5,7	7,6	12,4
Исходная	61	100	1,26	0,46	59,4	100	61,5	100
Кл.-40+20 мм								
Концентрат	11	48	2,65	0,85	22,6	94,6	20,8	91,6
Хвосты	12	52	0,14	0,072	1,3	5,4	1,9	8,4
Исходная	23	100	1,35	0,45	23,9	100	22,7	100
Несепарируемый класс								
Отсев -20 мм	16	-	1,35	0,45	16,7	-	15,8	-

Суммарные показатели								
Концентрат + отсев -20 мм	55	-	2,23	0,74	95,3	-	90,5	-
Хвосты	45	-	0,14	0,1	4,7	-	9,5	-
Исходная рудная галля	100	-	1,30	0,45	100	-	100	-

Рентгенофазовый анализ концентрата РРС показал наличие в исследуемой пробе рудных минералов: халькопирита, борнита, пирита, пирротина, пентландита, арсенопирита. Минералы пустой породы представлены слюдами, пироксенами, полевым шпатом и глинистыми минералами. По содержанию основных ценных компонентов Cu и Ni (табл. 2), исследованная рудная галля беднее исходной руды, подаваемой в мельницу самоизмельчения: 1,3% и 0,45% против 2,84 % и 2,1% меди и никеля соответственно, т.к. при самоизмельчении в первую очередь разрушаются куски богатой руды. В результате РРС материала класса -80+20 мм получен концентрат с содержанием меди 2,65%, никеля 0,86%, и хвосты, в которых содержание меди и никеля, 0,14% и 0,1% соответственно, не превышают содержание в хвостах коллективной флотации по технологической схеме действующей фабрики.

Изучена измельчаемость концентрата рентгенорадиометрической сортировки по методике Ф.Бонда. Определено, что индекс Бонда (W_i) для концентрата РРС рудной гали составил 23 кВт*ч/т, при этом результаты определения W_i пробы исходной руды, поступающей на самоизмельчение -14кВт*ч/т. Высшая степень крепости рудной гали была зафиксирована и при определении крепости по М.М.Протодьяконову. Повышенные прочностные свойства класса критической крупности, в сравнении с исходной шихтой, определяются составляющими его вкрапленными рудами, отличающимися высокой крепостью, а также породной составляющей, представленной габбродолеритами, роговиками, метасоматитами, базальтами и кварцевым песчаником.

Технологические свойства концентрата РРС из рудной гали оценивались применительно к схеме и режиму коллективной флотации, принятой на Талнахской фабрике. В настоящее время здесь реализована коллективно-селективная схема, включающая коллективный цикл флотации минералов меди и никеля при крупности 65% класса -0,044 мм; получение медного концентрата в одноименном цикле при доизмельчении коллективного концентрата до 93% класса -0,044 мм; флотацию никельсодержащих минералов из хвостов медного цикла после доизмельчения до 93% класса -0,044 мм.

Для определения оптимальных условий флотационного обогащения продукта РРС, оценено влияние тонины помола и степени раскрытия минералов на показатели обогащения. Реагентный режим во флотационных опытах на рудной гале был принят аналогичным тому, что применяется в операции коллективной флотации на фабрике. Для достижения требуемой тонины помола 65% класса -0,044 мм в операции коллективной флотации, время измельчения концентрата рудной гали в лабораторной мельнице составило 40 минут при условиях Т : Ж : Ш=1:0,5:12. Время измельчения в разных опытах варьировалось для оценки степени раскрытия сростков в концентрате сортировки на процесс флотации.

Результаты лабораторных флотационных исследований представлены на рисунках. При увеличении тонины помола питания (класса - 0,044 мм от 65% до 85%), выход флотационного концентрата возрастает незначительно, в то же время растет извлечение меди на 3,4% и никеля на 1,8% (рис.6). Рост извлечения ценных компонентов во флотационный концентрат сопровождается снижением их содержания в хвостах флотации при увеличении тонины помола, в то же время, качество коллективного концентрата при этом практически не меняется. Таким образом, повышение извлечения в коллективный концентрат при увеличении времени измельчения, объясняется вскрытием тонкой

вкрапленностирудных минералов в породе, при сохранении богатых сростков и сростков халькопирита и пентландита с пирротинном.

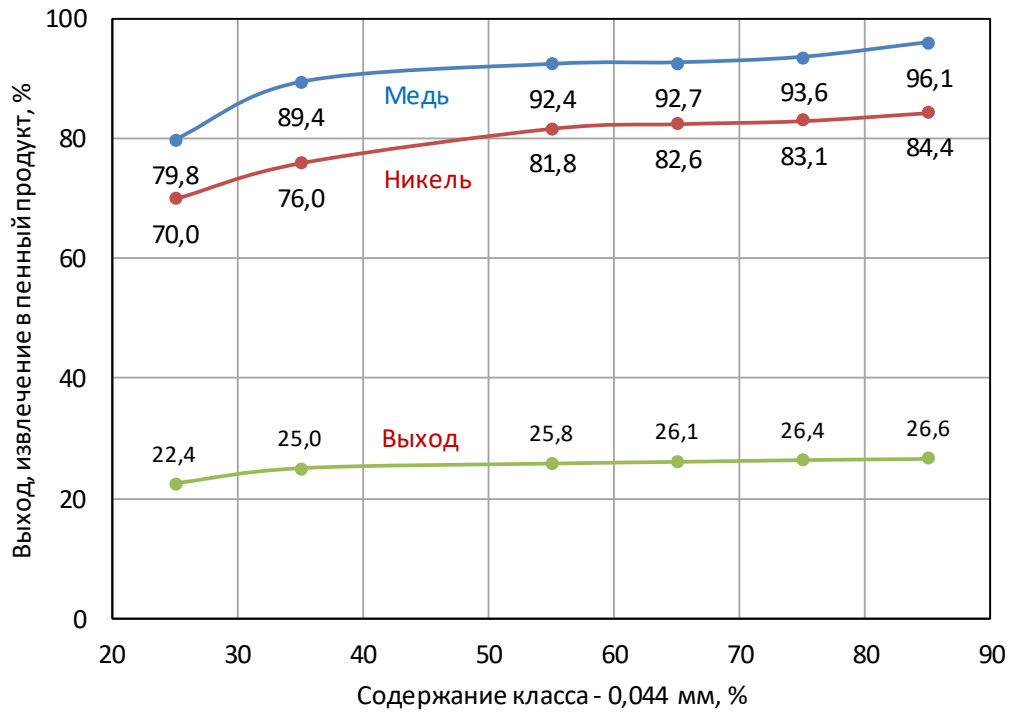


Рисунок 5 –Зависимость извлечения меди и никеля в коллективный концентрат от тонины помола питания

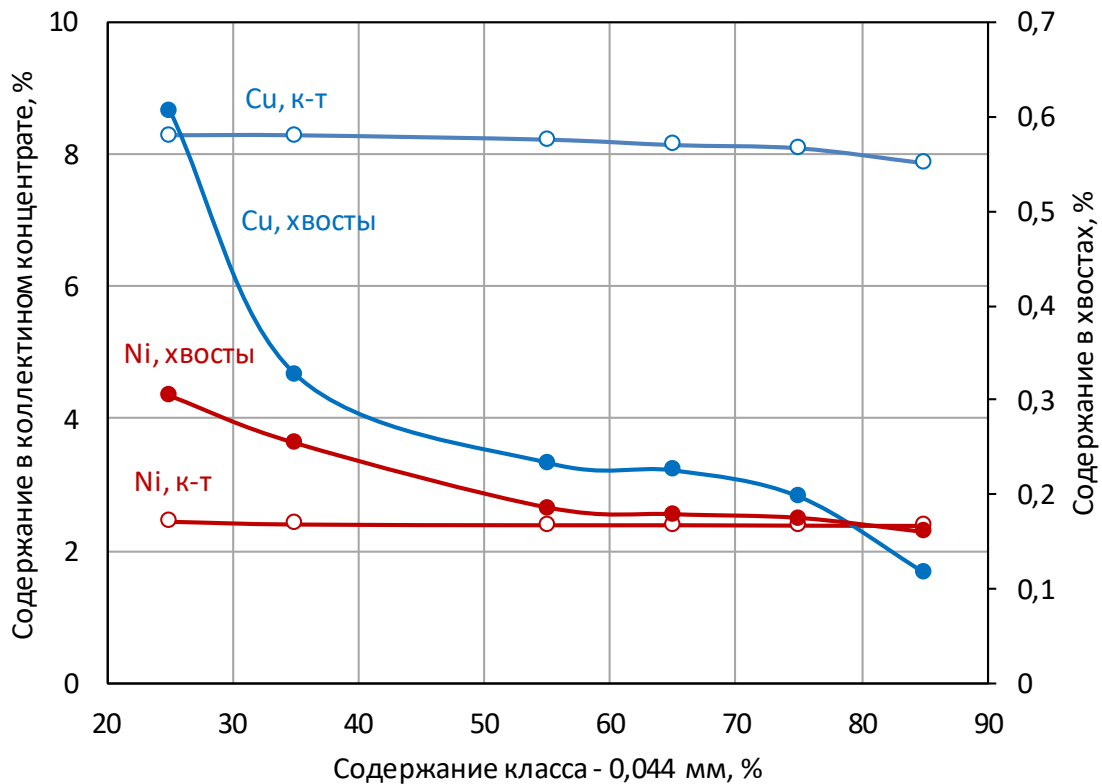


Рисунок 6 –Влияние тонины помола питания на содержание металлов в хвостах и концентрате коллективной флотации

Проведенные исследования показали существенные отличия технологических свойств концентрата РРС, полученного при сортировке рудной гали мельницы МПСИ, от

свойств исходной шихты. Материал отличается трудной измельчаемостью, плохим раскрытием и, как следствие, трудной обогатимостью. Отвальное содержание меди и никеля в хвостах флотации достигается при существенно более тонком помоле до 90% класса минус 0,044 мм. В действующей схеме этот материал не выделяется в отдельный продукт, а обрабатывается в одном потоке с более легкообогатимыми разностями исходной шихты, определяя ухудшение обогатимости результирующей смеси, снижение показателей извлечения и качества концентрата.

Выделение такого труднообогатимого материала в отдельный продукт может дать дополнительные возможности в оптимизации технологии, но сопряжено также и с дополнительными издержками. Обработка концентрата РРС в условиях фабрики может осуществляться в разных вариантах, отличающихся сложностью, капитальными затратами и получаемым эффектом. Во всех вариантах достигается увеличение производительности и некоторое снижение удельных энергозатрат фабрики за счет вывода из процесса кусковых хвостов.

1 вариант. Обработка концентрата РРС в отдельном цикле коллективной флотации, при тонком помоле до 90% -0,044 мм. Этот вариант наиболее сложен и дорог, однако только он позволяет получить из труднообогатимого материала отвальные хвосты. При этом основной поток, освобожденный от труднообогатимой составляющей, также улучшит показатели извлечения и качества.

2 вариант. Разупрочнение концентрата РРС при мелком дроблении в валках высокого давления, с возвратом продукта валков в мельницу самоизмельчения, либо с обработкой его в шаровой мельнице второй стадии. Этот вариант менее затратный, так как не требует организации отдельного флотационного цикла, но и он позволяет, хотя и в меньшей степени, улучшить показатели обогащения труднообогатимых фракций руды за счет улучшения их раскрытия.

3 вариант. Возврат концентрата РРС в мельницу самоизмельчения сразу, либо после додробливания в конусной дробилке мелкого дробления. Здесь достигается только увеличение производительности цикла и некоторое снижение удельных энергозатрат за счет вывода из процесса кусковых хвостов повышенной прочности.

На основании полученных результатов, выполнен укрупненный сравнительный технический расчет вариантов с использованием и без использования РРС для сортировки рудной гали в условиях фабрики по третьему, «минимальному» варианту, требующему минимального объема реконструкции (табл. 3).

Таблица 3 – Сравнительные показатели существующей схемы и схемы с РРС

Наименование показателей	Без РРС	с РРС
Свежая руда (с рудника), тыс. т/год	10000	10450
Циркулирующая нагрузка МПСИ, %	10%	10%
Питание МПСИ (свежая руда + концентрат РРС), тыс. т/год	11000	11000
Рудная галля, тыс. т/год	1000	1000
Питание РРС, тыс. т/год		1000
Выход хвостов РРС, %		45%
Хвосты РРС, тыс. т/год		450
Концентрат РРС, тыс. т/год		550
Содержание Cu в исходной руде, %	2,91%	2,91%
Содержание Ni в исходной руде, %	2,04%	2,04%
Извлечение Cu в Сук-т, %	88,67%	88,67%
Извлечение Ni в Ник-т, %	80,20%	80,20%
Содержание Cu в хвостах РРС, %		0,14%
Содержание Ni в хвостах РРС, %		0,10%

Дополнительно Cu в питании, тыс. т/год		13,095
Дополнительно Ni в питании, тыс. т/год		9,18
Дополнительно извлеченной Cu в Cu к-т, тыс. т/год		11,05
Дополнительно извлеченного Ni в Ni к-т, тыс. т/год		7,0015

При выходе рудной гали, отправляемой на рентгенорадиометрическую сортировку, на уровне 10 % от исходного питания, поступающего на фабрику, дополнительно за год можно увеличить пропускную способность мельницы на 450 тыс т/год. Предлагаемое технологическое решение, позволит создать резерв для дозагрузки мельницы МПСИ, что в свою очередь будет способствовать увеличению выпуска готовой продукции – медного и никелевого концентрата.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований, установлена эффективность применения рентгенорадиометрической сортировки рудной гали мельницы полусамозмельчения Галнахской обогатительной фабрики. Этот материал имеет пониженное содержание меди и никеля - 1,3% и 0,45% против 2,84 % и 2,1% соответственно в исходной руде и отличается высокой крепостью и энергоемкостью при измельчении, индекс Бонда (Wi) равен 22 кВт*ч/т. Введение операции РРС позволяет получить хвосты, также отличающиеся повышенной крепостью, в которых содержание меди и никеля не превышает содержания в хвостах коллективной флотации по действующей технологической схеме, с выходом на уровне 45% от исходной гали. Таким образом, выделение кусковых хвостов позволяет увеличить производительность мельницы самоизмельчения на 450 тыс. т/год, при выходе рудной гали на уровне 10%, и снизить энергоемкость последующего измельчения за счет удаления наиболее прочных составляющих шихты.

Полученный концентрат РРС также представлен упорным и трудноизмельчаемым материалом, в основном обломками вкрапленных и медистых руд, индекс Бонда (Wi) равен 23 кВт*ч/т. При измельчении его до крупности 65% класса – 0,044 мм, принятой на фабрике, при коллективной флотации получают хвосты с повышенным содержанием металлов – 0,23% и 0,18% меди и никеля соответственно. Повышение тонины помола до 85% -0,044 мм позволяет снизить хвостовое содержание до 0,12% меди и 0,16% никеля.

Результаты исследования РРС и коллективной флотации концентрата сортировки позволяют оценивать радиометрическую сепарацию в цикле полусамозмельчения не только как метод предварительной концентрации, но и как средство выделения из рудопотока упорной и трудноизмельчаемой составляющей, которая, в зависимости от условий фабрики, может обрабатываться в отдельных циклах, адаптированных для упорного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Aldrich C.** Consumption of steel grinding media in mills – A review // Minerals Engineering 49 (2013). – p.p. 77–91
- 2 **Lessard J., Jan de Bakker, McHugh L.** Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics // Minerals Engineering 65 (2014). – p.p.88–97.
- 3 **Wikedzi A., Arinanda M.A., Leibner T., Peuker U.A., Mütze T.** Breakage and liberation characteristics of low grade sulphide gold ore blends // Minerals Engineering 115 (2018). - p.33–40.
- 4 **Díaza E., Voisina L., Krachta W., Montenegro V.** Using advanced mineral characterisation techniques to estimate grinding media consumption at laboratory scale // Minerals Engineering 121 (2018). –p.p. 180–188.

5 **Lessard J., Sweetser W., Bartram K., Figueroa J., McHugh L.** Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit // *Minerals Engineering* 91 (2015). – p.p.92–99.

6 **Вейгельт Ю. П., Ростовцев В. И.** Интенсификация процессов обогащения медно-никелевых Норильских руд с использованием энергетических воздействий // *ФТПРПИ*. — 2000. — № 6.

7 **Чантурия В. А., Козлов А. П., Матвеева Т. Н., Лавриненко А.А.** Инновационные технологии и процессы извлечения ценных компонентов из нетрадиционного, труднообогатимого и техногенного минерального сырья. // *ФТПРПИ*, - 2012. - №5.

8 **Чантурия В. А., Лавриненко А. А., Саркисова Л. М., Иванова Т.А., Глухова Н.И., Шрадер Э.А., Кунилова И.В.** Действие сульфгидрильных фосфоросодержащих собирателей при флотации платинометального медно-никелевого минерального сырья // *ФТПРПИ*. – 2015. - №5

9 **Черноусенко Е. В., Нерадовский Ю.Н., Каменева Ю.С., Вишнякова И.Н., Митрофанова Г.В.** Повышение эффективности флотационного обогащения сульфидных медно-никелевых руд Печенгского рудного поля // *ФТПРПИ*, №6, 2018. С. 173-179.

10 **Ломоносов Г. Г., Туртыгина Н. А.** Влияние вещественного состава руд на показатели переработки // *ГИАБ*. 2010. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-veschestvennogo-sostava-rud-na-pokazateli-pererabotki>