

Газалеева Г.И., Щербакова З.Х.(ОАО «Уралмеханобр»),  
Червяков С.А., Иванова С.П. (ОАО «Уралмашзавод»)

### Современные методы сверхтонкого измельчения и селективного раскрытия минералов.

В последнее время появились аппараты, которые могут измельчать тонкодисперсные минеральные комплексы до крупности 1 – 0,2 мкм с тем, чтобы извлекать полезные минералы данной крупности, что в последующем позволяет извлекать ранее недоступные частицы, например методом цианирования и гидрометаллургии. К таким аппаратам в первую очередь относятся мельницы **IsaMill** и **Vertimill**.

Бисерная мельница **IsaMill** работает по принципу истирания мелкой измельчающей средой при высокой окружной скорости вращения барабана. На рис. 1 показан принцип действия мельницы IsaMill.

Мелкая измельчающая среда и высокая скорость вращения барабана увеличивают вероятность столкновения частиц руды и среды, приводя к тонкому измельчению при относительно низком энергопотреблении.

IsaMill при крупности среды 1 мм имеет на кубометр в 730 раз больше среды, чем вертикальная мельница, загруженная шарами 12 мм, что и объясняет ее высокую эффективность. Мельница IsaMill, в отличие от шаровой мельницы «сжимает» ситовую характеристику. При этом достигается высокая степень измельчения в открытом цикле, благодаря использованию энергии в основном для измельчения крупных частиц, чем минимизируется ошламование.

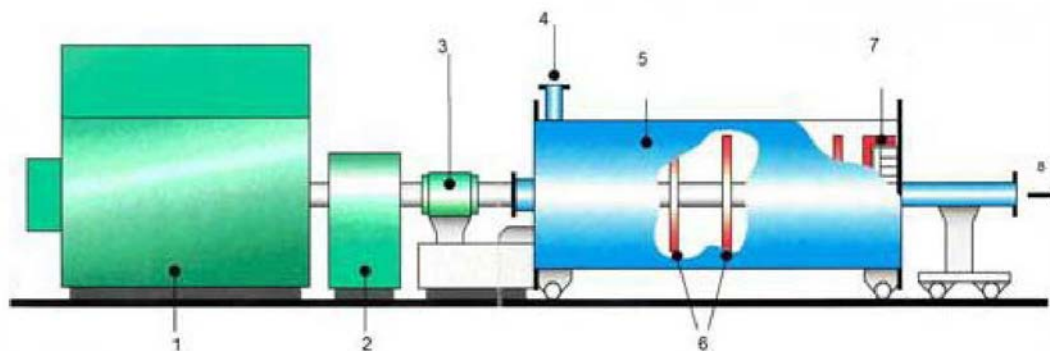


Рис. 1. Принципиальное устройство мельницы ISA MILL:  
1 – привод; 2 – редуктор; 3 – осевой опорный подшипник; 4 – питание; 5 – барабан; 6 – измельчающие диски; 7 – высокоскоростной сепаратор; 8 – продукт

Восемь последовательных камер и высокоскоростной сепаратор обеспечивают узкий диапазон крупности продукта.

Питание мельницы проходит через 8 последовательных этапов измельчения между дисками, прежде чем оно достигнет внутреннего классификатора. Другие мельницы при одной стадии измельчения требуют замкнутого цикла и высокой циркуляционной нагрузки, но не дают такой характеристики распределения частиц по крупности, как IsaMill.

В качестве мелющей среды в IsaMill может быть использован шлак, песок или гальку, имеющих низкую стоимость, а также более дорогие керамические шары высокого качества.

Гранулометрические характеристики питания и продуктов измельчения Мельницы на продуктах золотоизвлекательной фабрики представлены на рисунке 2.

### 1. Теоретическое описание процессов тонкого измельчения

Процесс измельчения тонкодисперсных комплексов в бисерных мельницах и мельницах типа **IsaMill** и **Vertimill** можно описать уравнениями, описывающими прирост удельной поверхности материала в процессе тонкого измельчения.

При этом форма частицы принимается за шар.

В интегральном виде удельная поверхность исходного на измельчение тонкого продукта запишется как:

$$S_0 = n \frac{\pi}{Q} \int_{d_0}^{d_n} d \cdot w_0(d) d d, \quad (1)$$

где диаметр частицы в исходном продукте будет изменяться от  $d_0$  до  $d_n$ ;  $w_0(d)$  – плотность распределения диаметра частицы исходного продукта.

Выражение (1) справедливо для неклассифицированного продукта, когда  $d$  в исходном продукте изменяются в широком диапазоне.

Для удельной поверхности измельченного продукта формула будет следующей:

$$S_p = n_1 \frac{\pi}{Q} \int_{d_1}^{d_k} d \cdot w_1(d) \cdot d d, \quad (2)$$

где диаметр частицы  $d$  в конечном продукте будет изменяться от  $d_1$  до  $d_k$ ;  $w_1(d)$  – плотность распределения диаметра частиц измельченного тонкого продукта;  $Q$  – единичный объем камеры измельчения,  $n$  и  $n_1$  – количество частиц в элементарном единичном объеме в камере измельчения до и после измельчения соответственно.

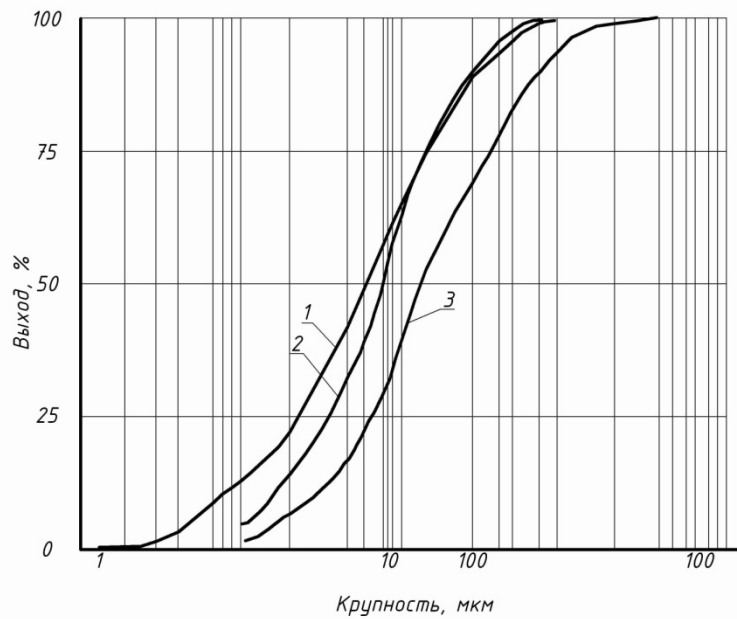


Рисунок 2 – Гранулометрическая характеристика при измельчении продукта в мельнице Isamill.

1 – продукт переработки медных хвостов на опытной мельнице IsaMill; 2- питание медные хвосты; 3 – исходный продукт хвосты золотоизвлекающей фабрики.

Прирост удельной поверхности измельченных тонких частиц будет равен разности удельных поверхностей измельченного и исходного продуктов.

В интегральном виде прирост удельной поверхности неклассифицированного продукта запишется как:

$$\Delta S = \frac{\pi}{Q} \cdot \left( \int_{d_1}^{d_k} d \cdot w_1(d) \cdot dd n_1 - \int_{d_0}^{d_n} d \cdot w_0(d) \cdot dd n \right). \quad (3)$$

Данная формула может быть использована для расчета прироста удельной поверхности по средним диаметрам исходных и измельченных частиц и наоборот.

Особенность сверхтонкого измельчения заключается в предположении, что  $d_k \rightarrow 0$ ,  $d_1 \rightarrow 10$  мкм. То есть, размер частиц после тонкого измельчения составляет 0,5 – 10 мкм.

## **2. Лабораторные исследования по доизмельчению в бисерной мельнице хвостов флотации шлаков**

В ОАО «Уралмеханобр» были проведены лабораторные исследования по изучению процесса измельчения в горизонтальной бисерной мельнице ультратонкого измельчения Supermill, модель ЕНР, рис. 3. крупностью от 50 до 0,2 микрон, в открытом цикле, в непрерывном режиме.

Измельчающей средой являлись износостойкие шары (бисер) диаметром 1- 3 мм и удельным весом  $6,25 \text{ г/см}^3$ , изготовленные из материала на основе поликристаллов диоксида циркония.



Рисунок 3. Общий вид бисерной мельнице ультратонкого измельчения Supermill, модель ENP.

Исходная проба для исследований - хвосты флотации шлака.

На рис. 4 представлены гранулометрические характеристики исходного и измельченного шлака.

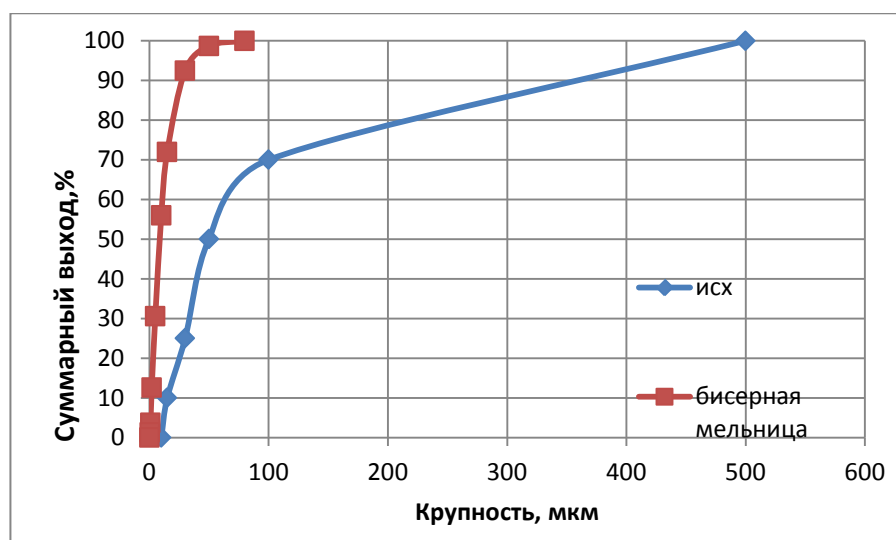


Рисунок 4 – Гранулометрические характеристики исходного и измельченного в бисерной мельнице шлака

Далее по формуле (3) был рассчитан прирост удельной поверхности шлака в процессе тонкого измельчения. Результаты сравнения расчетных и фактических данных прироста удельной поверхности продуктов различной степени помола приведены в табл. 1

Таблица 1 - Результаты сравнения прироста расчетной и фактической удельной поверхности шлака в результате тонкого измельчения

Показатель	11,74% кл. -0,071	38,26% кл. -0,071	55,78% кл. -0,071
Прирост, $\text{дм}^2/\text{г}$			
расчет	352,3	427,8	515,2
факт	348	430	511,2

Фактическая удельная поверхность замерялась по прибору ПСХ. Результаты расчетов показывают хорошую сходимость расчетных данных с фактическими. Таким образом, прирост удельной поверхности материала в процессе тонкого измельчения может служить мерой оценки эффективности процесса.

Также в таблице 2 представлены данные по раскрытию минералов меди в отдельных классах крупности при различной степени тонкого измельчения.

Таблица 2 - Степень раскрытия медных минералов в отдельных классах крупности при различном содержании класса минус 0,012 мм

Класс крупности	Содержание класса минус 0,012 мм в измельчённом продукте, %					
	11,74		38,26		55,78	
	Медные минералы					
	В виде свободных зерен	В много минеральных сростках	В виде свободных зерен	В много минеральных сростках	В виде свободных зерен	В много минеральных сростках
+0,024	Е.з.	100	54	46	63	37
-0,024+0,012	60	40	90	10	92	8
-0,012+0,006	95	5	99	1	99	1
-0,006	99	1	100	Е.з.	100	Е.з.

Из данных таблицы следует, что в классе  $-0,024+0,012$  мм при содержании класса минус  $0,012$  мм в измельченном материале -  $38,26$  % и  $55,78$  % доля свободных минералов меди составляет  $90-92$  %.

По результатам распределения частиц по размерам в зависимости от времени измельчения можно сделать вывод, что с увеличением тонины помола исходного продукта в бисерной мельнице, относительное количество минеральных частиц крупностью  $0,012$  мм увеличивается за счет разрушения многокомпонентных сростков с образованием большего количества зерен породообразующих минералов и свободных минералов меди.

На продуктах измельчения шлака в бисерной мельнице были выполнены флотационные исследования.

Все флотационные опыты проводились в открытом цикле с использованием оборотной воды с использованием бутилового ксантогената калия и вспенивателя Т-80.

Результаты экспериментов показали, что с увеличением тонины помола измельчённого продукта до  $55,78$  % класса минус  $0,012$  мм снижение массовой доли меди в отвальных хвостах происходит с  $0,37$  % до  $0,26$  %. Качество пенного продукта при наименьшем содержании меди в отвальных хвостах составляет  $0,87$  %.

### ***3. Сравнение показателей шарового, ультратонкого и селективного измельчения медно-цинковой руды Урупской обогатительной фабрики.***

Исследования проводились в условиях ОАО «Уралмеханобр» на шаровой и бисерной лабораторных мельницах, а также на роторно-пульсационной установке (РПА).

Роторно-пульсационная установка (РПА), рис. 5, предназначена для измельчения материала в резонансном режиме нагружения с разрывом по спайкам минеральных частиц.



Рисунок 5. Роторно-пульсационный аппарат РПА.

Для обогащения медно-цинковой руды Урупского месторождения была выбрана схема коллективно-селективной флотации, включающей флотацию сульфидных минералов меди и цинка в коллективный концентрат, а затем доизмельчение коллективного концентрата на различных аппаратах с дальнейшим проведением медной флотации.

В таблице 3 приведены сравнительные гранулометрические характеристики продуктов тонкого измельчения руды Урупского месторождения различными методами.

Таблица 3 – Сравнительные гранулометрические характеристики материала, полученные при доизмельчении коллективного концентрата в шаровой мельнице и аппаратах ультратонкого измельчения

Классы крупности, мм	Содержание классов крупности после доизмельчения, %		
	Шаровая мельница	РПА	Бисерная мельница
-0,045+0,024	65,38	61,56	25,14
-0,024+0,012	18,54	16,23	39,96
-0,012+0,006	9,73	11,80	14,09
-0,006+0,000	6,35	10,41	20,81
Итого	100,00	100,00	100,00

В таблице 4 приведена степень раскрытия сульфидных минералов при доизмельчении коллективного концентрата в шаровой, бисерной мельницах и установке РПА.

Таблица 4 – Сравнительные данные по раскрытию сульфидных минералов при доизмельчении коллективного концентрата

Классы крупности, мм	Халькопирит				Сфалерит				Пирит				Нерудные							
	Свободные зерна	Сростки			Свободные зерна	Сростки			Свободные зерна	Сростки			Свободные зерна	Сростки						
		Многокомпонентные	С нерудными	Со сфалеритом		С пиритом	Многокомпонентные	С нерудными		С халькопиритом	С пиритом	Многокомпонентные		С пиритом	С халькопиритом	Со сфалеритом				
<b>Шаровая мельница</b>																				
Коллективный концентрат	82	2	-	Е.з.	16	66	5	-	4	25	93	2	-	2	3	100	-	-	-	-
<b>РПА</b>																				
Коллективный концентрат	85	1	-	1	13	74	1	-	5	20	93	1	-	2	4	100	-	-	-	-
<b>Бисерная мельница</b>																				
Коллективный концентрат	91	1	-	Е.з.	8	84	2	-	2	12	96	1	-	1	2	100	-	-	-	-

Примечание - Е.з – единичные зерна

Сравнение результатов показало:

- максимальное увеличение содержания классов -0,024+0,012 мм и -0,006 мм происходит после доизмельчения в бисерной мельнице;

- наилучшие результаты по раскрытию сульфидных минералов получены при доизмельчении коллективного концентрата в бисерной мельнице, (халькопирит раскрыт на 91 %, сфалерит – на 84 % и пирит – на 96 %);

- при доизмельчении коллективного концентрата в РПА содержание свободных зёрен халькопирита, сфалерита и пирита составляет – 85 %, 74 % и 93% соответственно;

- в то же время, при доизмельчении коллективного концентрата в шаровой мельнице свободных зёрен халькопирита, сфалерита и пирита в измельченном продукте содержится 82%, 66% и 93 % соответственно.

В таблице 5 приведены сравнительные показатели обогащения руды Урупского месторождения после доизмельчения коллективного концентрата в роторно-пульсационной установке, шаровой и бисерной мельницах.

Таблица 5 – Сравнительные показатели обогащения руды Урупского месторождения при доизмельчении коллективного концентрата

Продукты обогащения	Выход, д, %	Массовая доля			Извлечение, %		
		медь, %	цинк, %	золото, г/т	медь	цинк	золото
<b>Шаровая мельница</b>							
Медный концентрат	7,53	20,10	6,89	4,20	90,09	41,84	26,36
Отвальные хвосты	92,47	0,18	0,78	0,96*	9,91	58,16	73,64
Исходная руда	100,00	1,68	1,24	1,20	100,00	100,00	100,00
<b>РПА</b>							
Медный концентрат	7,40	20,48	9,25	4,10	90,21	55,20	25,28
Отвальные хвосты	92,60	0,18	0,60	0,97*	9,79	44,80	74,72
Исходная руда	100,00	1,68	1,24	1,20	100,00	100,00	100,00
<b>Бисерная мельница</b>							
Медный концентрат	6,77	22,65	6,12	4,50	91,27	33,41	25,39
Отвальные хвосты	93,23	0,16	0,89	0,96*	8,73	66,59	74,61
Исходная руда	100,00	1,68	1,24	1,20	100,00	100,00	100,00
Примечание - * - значение получено расчетным путем							

Лучшие показатели получены при использовании бисерной мельницы. Качество медного концентрата повышается по сравнению с фактическими

данными на обогатительной фабрике на 2,55 % (с 20,10 % до 22,65 %) при повышении извлечении меди на 1,18 % (с 90,09 % до 91,27 %).

Медный концентрат представлен преимущественно халькопиритом, содержание которого находится в районе 64%. Помимо халькопирита медьсодержащими минералами, в медном концентрате, являются борнит и теннантит, суммарное содержание которых составляет 5,4 %, табл.6

Таблица 6 - Минеральный состав продуктов обогащения руды Урупского месторождения

Минералы	Массовая доля, %	
	Медный концентрат	Отвальные хвосты
Пирит	18,0	57,3
Халькопирит	64,0	<0,1
Борнит	5,0	<0,1
Теннантит	0,4	0,3
Сфалерит	9,1	1,2
Гипс	<0,1	1,0
Кварц	0,8	19,4
Серицит	0,6	6,0
Хлорит	0,7	6,8
Карбонат	0,6	4,0
Полевой шпат	0,6	3,0
Окислы железа	0,2	1,0

Минералогический анализ конечных продуктов обогащения показал, что, в целом, в медном концентрате халькопирит раскрыт на 99 %, сфалерита в свободном виде находится 93 %, пирита – 88 %.

#### 4. Операции оттирки поверхности техногенного сырья

В настоящее время отходы металлургических и обогатительных производств представлены различными видами материалов. Это всевозможные шлаки, клинкеры, золы и тонкие шламы. Одними из таких отходов являются красные шламы, получаемые в результате переработки боксита в глинозем. Их количество - более 1 млн. т. в год на каждом алюминиевом заводе России. Общий объем скопившихся красных шламов по России составляет около 200 млн. т.

В ОАО «Уралмеханобр» были проведены исследования по разработке схемы переработки красных шламов с получением железосодержащего продукта и агломерата. Исходный красный шлам гидрохимического производства подвергался магнитной сепарации, центробежной концентрации, после чего тяжелая фракция снова переочищалась в магнитном поле. Первоначально по такой схеме удалось выделить железосодержащий продукт с выходом 10,4 %, содержанием  $Fe_{\text{общ}}$  41,1 % и извлечением последнего 12,7%.

Минералогические исследования исходного красного шлама, представленные на рис. 6, 7, показали, что в данном продукте находится значительное количество флокул, в которые включены железосодержащие минералы.

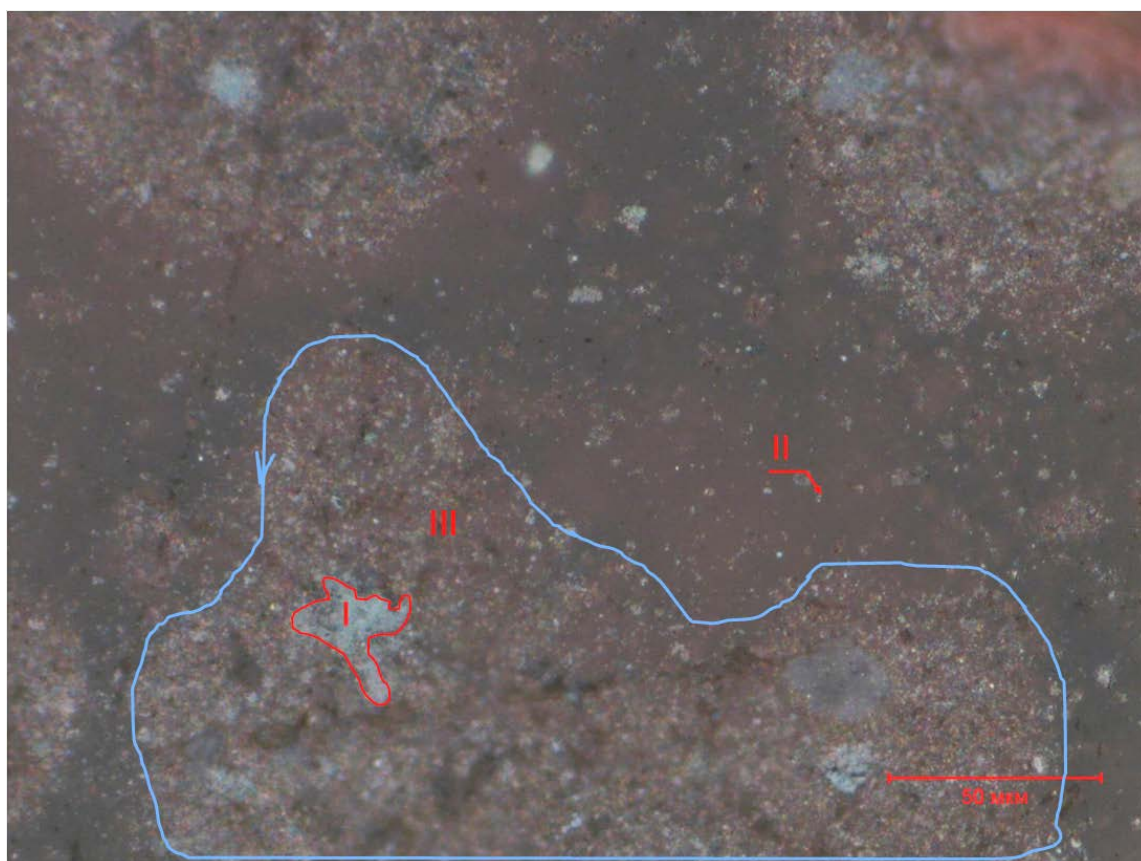


Рисунок 6 - Исходная проба красных шламов. Гематитовый агрегат(I) окруженный микро-зернами рудных и нерудных минералов(II). II – свободные микро-зерна минералов. Полированный аншлиф, отраженный свет, без анализатора, увеличение  $500\times$ .

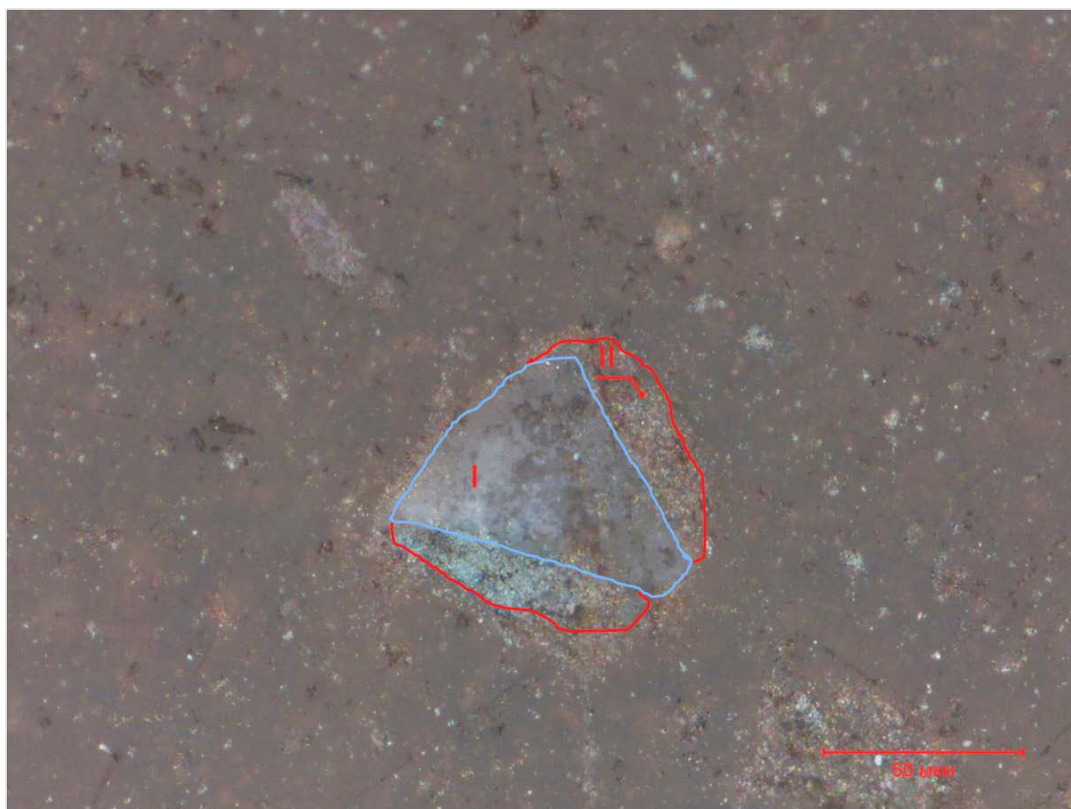


Рисунок 7 - Исходная проба красных шламов. Зерно кальцита(I) окруженное микро-зернами рудных и нерудных минералов(II).

Полированный аншлиф, отраженный свет, без анализатора, увеличение 500<sup>x</sup>.

На основании этих данных для выделения отдельных частиц минералов из флокул была проведена их обработка в роторно-пульсационном аппарате ПРА, который создает ультразвуковые и кавитационные воздействия на флокулы.

Проба красных шламов обрабатывалась на установке РПА в замкнутом цикле, в циркуляции в течение 10 минут. В пульпу добавлялся диспергатор - ГМФ в количестве 50 г/т.

После оттирки в РПА была снова реализована схема с использованием высокоградиентной магнитной сепарации и центробежной классификации.

При изменении порядка переработки красных шламов, с введением оттирки на РПА выход железосодержащего концентрата снизился до 6,3 %, при повышении содержания железа до 50% .

На рис. 8, 9 проведены гранулометрические характеристики исходных красных шламов до и после обработки в РПА.

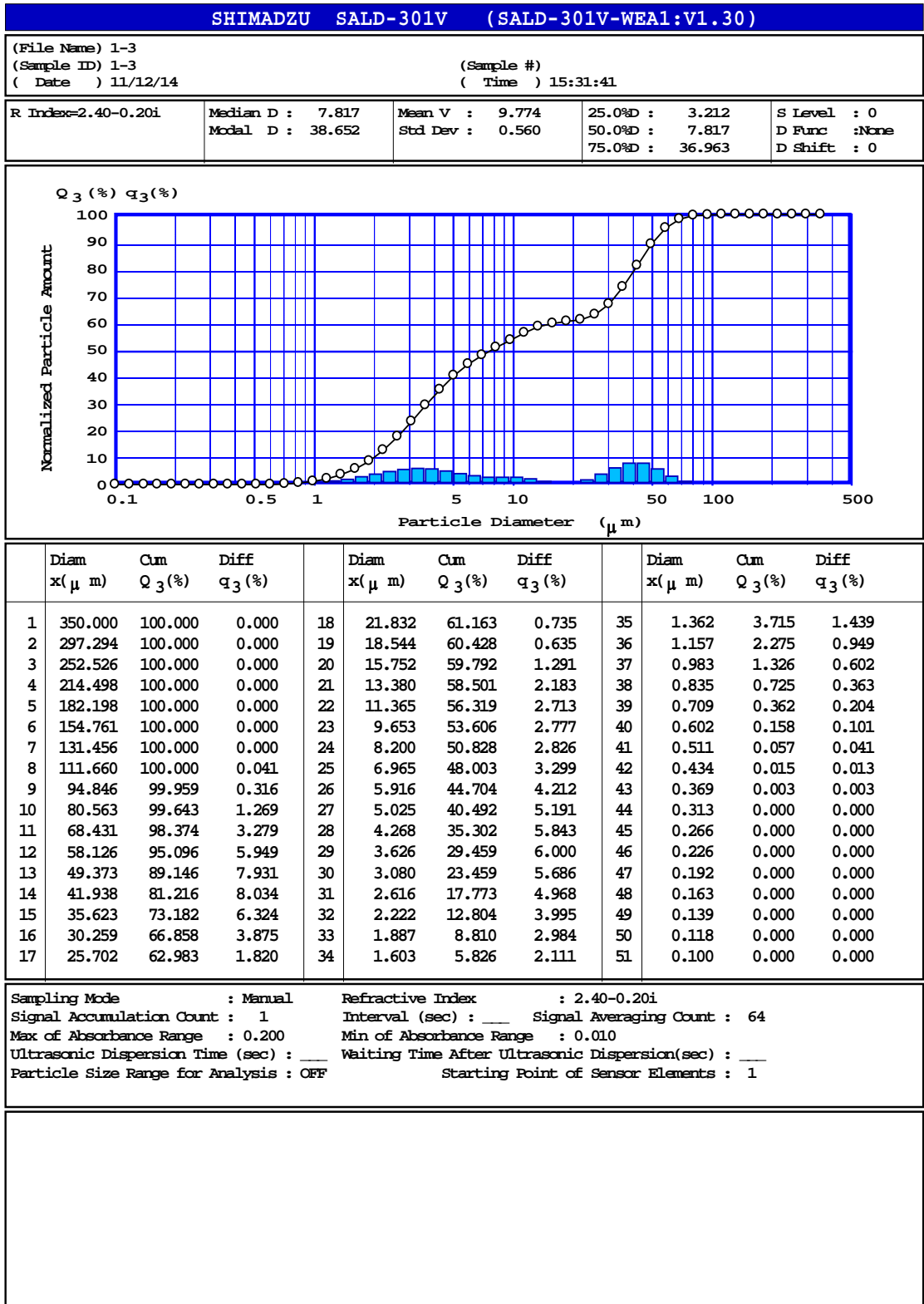


Рисунок 8 – Гранулометрическая характеристика исходных красных шламов

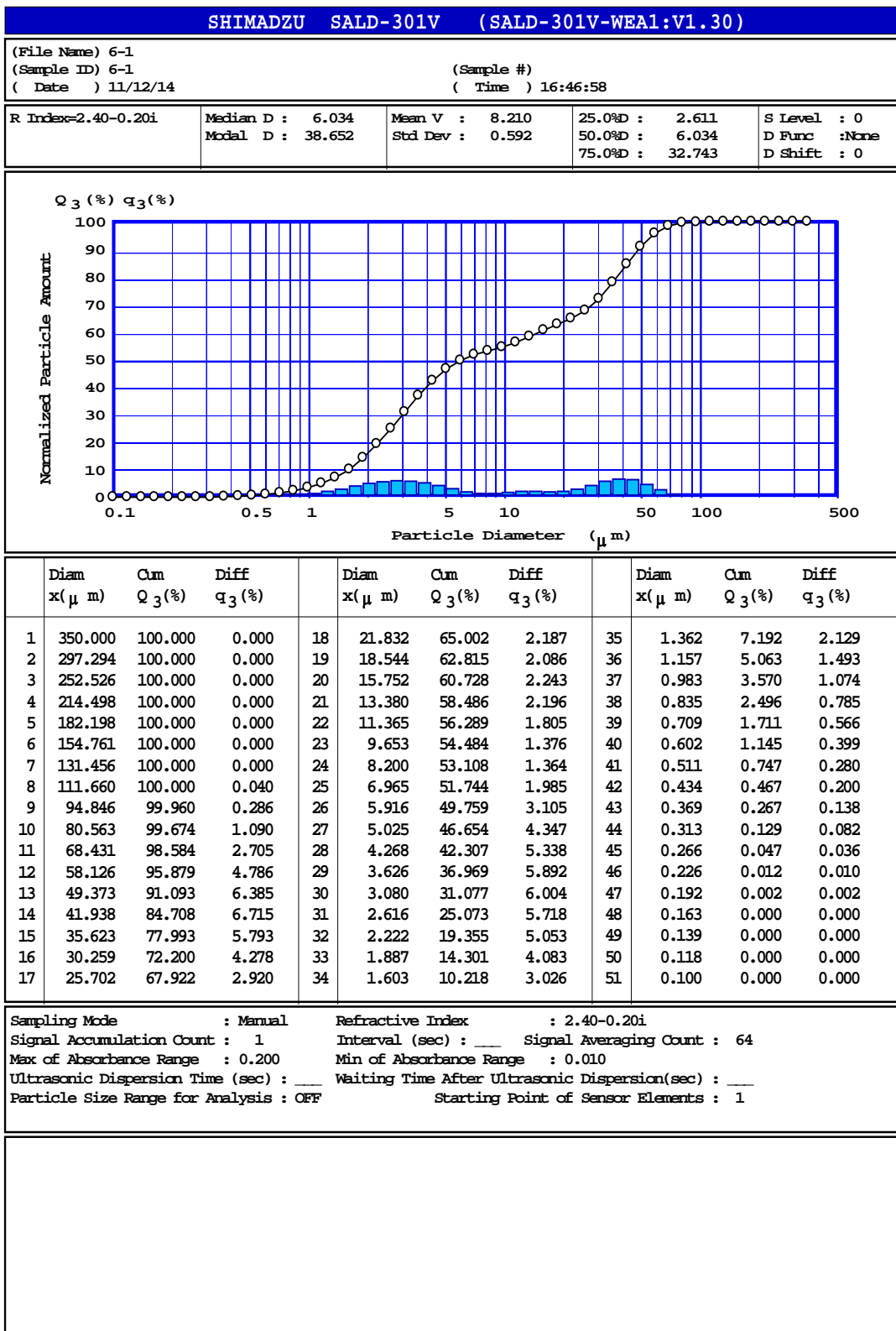


Рисунок 9 – Гранулометрическая характеристика продукта РПА

Из рис. 8, 9 следует, что при воздействии на красные шламы кавитационным способом в материале увеличивается содержание мелких классов: 5 мкм – на 9 %, 20 мкм – на 5 %. Это показывает на то, что именно в этой крупности находятся зерна мономинералов, которые ранее входили в состав флокул.

**Выводы.**

- В настоящее время актуальным для доизвлечения частиц полезных минералов крупностью 1 – 0,2 мкм является сверхтонкое бисерное измельчение
- Основной характеристикой процесса сверхтонкого измельчения является интегральный прирост удельной поверхности материала в результате измельчения
- Результаты экспериментов по сверхтонкому измельчению хвостов флотации шлаков УГМК показали, что с увеличением тонины помола измельчённого продукта до 55,78 % класса минус 0,012 мм снижение массовой доли меди в отвальных хвостах происходит с 0,37 % до 0,26 %.
- Сравнение результатов обогащения медной руды Урупского месторождения после доизмельчения коллективного концентрата в роторно-пульсационной установке (РПА), шаровой и бисерной мельницах показали, что наиболее эффективным аппаратом является бисерная мельница. Она позволяет повысить качество медного концентрата по сравнению с фактическими данными по обогатительной фабрике на 2,55 % (с 20,10 % до 22,65 %) при повышении извлечения меди на 1,18 % (с 90,09 % до 91,27 %).
- К сверхтонким аппаратам можно отнести и роторно-пульсационный аппарат, который не предназначен для значительного изменения крупности материала, но с помощью процесса кавитации селективно воздействует на поверхность частиц и флокул, разбивая последние и подготавливая для дальнейшего обогащения чистые минеральные частицы, как это происходит с красными шламами.