

## ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ СЕПАРАЦИИ ВОЛЬФРАМОВЫХ РУД ВЕРХНЕ-КАЙРАКТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Кулмухамедов Г.К., Лигай А.Б.*

ТОО «Северный Катпар», Караганда, Республика Казахстан

[gani.kulmuhamedov@skatpar.kz](mailto:gani.kulmuhamedov@skatpar.kz)

ТОО «Северный Катпар» является дочерним зависимым обществом АО «Национальная горнорудная компания Тау-Кен Самрук» и обладает контрактом на вольфрамовое месторождение Верхнее Кайракты. Месторождение входит в тройку крупнейших вольфрамовых месторождений мира с запасами 1 200 000т  $WO_3$ . Освоение месторождения осложняется из-за низкого содержания вольфрама в руде (0,12-0,14%  $WO_3$ ). Одним из технических решений для улучшения показателей проекта является введение в технологическую схему переработки руды операции предварительного обогащения.

Первая стадия исследований предусматривала испытание рентгенолюминесцентной, рентгенорадиометрической и рентгено-абсорбционной сепарации. Испытания первого метода проводилось

на базе НПО «Буревестник» (Санкт-Петербург), второго метода – на базе ОАО «Институт Ирриредмет» (Иркутск), третьего метода – на базе ТОО «Тране Текникк», полномочного представителя компании «Томра Сортинг» на постсоветском пространстве. Для объективности сравнения результатов все 3 испытания проводились на одной партии руды.

Исследования показали, что из-за природных особенностей исследуемой руды (химический и минеральный состав, текстурно-структурные характеристики) наилучшие результаты получаются при использовании рентгено-абсорбционной технологии.

XRT-аппарат фирмы TOMRA обеспечил лучшие результаты относительно 2 других методов. В случае с нашей рудой

Таблица 1 – Тестирование дубликата пробы в сопоставимых условиях, испытанной ранее в Тране Текникк

Класс крупности, мм	Выход хвостов, %		Содержание в концентрате		Содержание в хвостах		Извлечение, %	
	Tomra	HPY	Tomra	HPY	Tomra	HPY	Tomra	HPY
-70+30	41,92	47,72	0,169	0,14	0,033	0,031	87,69	83,19
-30+15	65,86	51,15	0,275	0,23	0,058	0,035	71,13	86,26
-15+8	99,35	52,6	0,154	0,228	0,121	0,034	5,86	86,09
-8+0	Не сорт.	Не сорт.	0,235	0,235	Не сорт.	Не сорт.	100*	100*
Итого	51,8	43,68	0,197	0,197	0,063	0,028	85,73	95,48

\*- класс (-8+0) мм не сортировался и объединялся с концентратом

в его пользу сыграли все его преимущества: высокая рентгеновская плотность вольфрама, обеспечившая контраст на фоне породных элементов, полное просвечивание рудного куска, позволившее обнаруживать отдельные зерна минералов вольфрама внутри куска, а также успехи программистов в технологии искусственного интеллекта и машинного обучения, приведшие к разработке программы распознавания минералов вольфрама по монохроматическому изображению.

Для проведения 2 этапа были привлечены 3 основных китайских компании, производящих XRT- сепараторы: Hao Peng Yu Technology (Ганжоу), Beijing Honest Technology (Пекин), Tianjin Meiteng Technology (Тяньцзин).

Для заверки результатов Тране Текникк и сравнения показателей сепарации фирма Hao Peng Yu Technology провела в сопоставимых условиях те-

стирование дубликата пробы, испытанной ранее в Тране Текникк. Результаты приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы, сепаратор марки HPU Classic 1400 показал существенно лучшие результаты на мелком классе крупности -15 + 8 мм при сопоставимых показателях для более крупных классов. Для успешной сепарации мелкого класса требуется либо детектор с большей разрешительной способностью (с большей плотностью пикселей), либо использование алгоритма разделения, отличного от алгоритма Томра.

После заверки результатов Тране Текникк были проведены исследования по сепарации рядовых, бедных и забалансовых руд месторождения, результаты которых приведены в таблице 2.

Как видно из этих данных, все сорта руд допускают эффективную рентгеновскую сортировку с получением обогащенного продукта, пригодного

**Таблица 2 – Исследования по сепарации рядовых, бедных и забалансовых руд месторождения Верхнее Кайракты**

Класс крупности, мм	Содержание, %			Сквозной выход хвостов, %	Извлечение, %
	Исх. руда	Концентрат	Хвосты		
Забалансовая руда					
+10-30	0,064	0,19	0,023	75,55	72,9
+30-60	0,066	0,109	0,014	45,68	90,37
Перечистка концентрата					
+10-30	0,16	0,22	0,03	84,19	72,86
+30-60	0,109	0,13	0,019	53,42	88,1
Рядовая руда					
+10-30	0,109	0,188	0,036	33,79	83,1
+30-60	0,127	0,181	0,027	40,87	92,44
Перечистка концентрата					
+10-30	0,188	0,24	0,043	64,21	78,11
+30-60	0,181	0,21	0,035	47,3	85,8

для последующей флотационной переработки. По мере снижения содержания вольфрама в исходной руде для сохранения высокого извлечения требования к содержанию в отвальных хвостах и к качеству сепарации ужесточаются. Для получения из бедных и забалансовых руд концентрата, содержащего более 0,2%  $WO_3$ , требуется перечистка концентрата.

Отдельно следует отметить результаты для забалансовых руд, переработка которых позволяет сократить коэффициент вскрыши до 0,14т/т руды, существенно снизить объём вскрышных работ на месторождении и повысить запасы вольфрама, обеспечивая сырьем работу будущего комбината далеко за пределы текущего столетия.

С целью выяснения возможности применения рентгеновских сепараторов других производителей было проведено тестирование руды на аппаратах компаний Beijing Honest Technology и Tianjin Meiteng Technology. Результаты приведены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, все аппараты показывают приблизительно одинаковые очень хорошие результаты. С учетом мелкого, не сортируемого класса -10+0 мм можно ожидать степени извлечения более 94%. Разница состоит в разной декларируемой производительности сепараторов, а также в содержаниях вольфрама в продуктах сепарации, что обусловлено особенностями конструкции детектора и алгоритма обработки рентгеновского образа рудного куска, исходных настроек программы.

Полупромышленные испытания проводились на керновой пробе рядовой руды, массой 37 тонн, на базе исследовательского центра Hao Peng Yu Technology. Представительность комpositной пробы обеспечивалась выбором точек заложения скважин в пределах проектного карьера с учетом данных детальной разведки. Таблица 4 содержит результаты полупромышленных испытаний.

Выход хвостов во время испытаний составил 35,79%, содержание в концентрате  $WO_3=0,19\%$ , в хвостах  $WO_3=0,029\%$ , извлечение  $WO_3=92,18\%$ ,

**Таблица 3 – Тестирование руды на аппаратах компаний Beijing Honest Technology и Tianjin Meiteng Technology**

Класс крупности, мм	Содержание, %			Сквозной выход хвостов, %	Извлечение, %
	Исх. руда	Концентрат	Хвосты		
Beijing Honest Technology					
+10-60	0,128	0,19	0,02	36,2	94,36
Tianjin Meiteng Technology					
+10-30	0,125	0,182	0,021	35,55	94,02
+30-60	0,13	0,181	0,018		95,67

Таблица 4 – Результаты полупромышленных испытаний

№ теста	Класс крупности, мм	Выход хвостов, %	Компонент	Содержание, %			Извлечение %
				в концентрате	в хвостах	в исх. руде	
1	+10-60	32.95	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.180	0.023	0.128	94.09
			<b>Mo</b>	0.0075	0.0049	0.0066	75.70
			<b>Bi</b>	0.0280	0.0040	0.0201	93.44
2	+10-60	33.38	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.140	0.026	0.102	91.49
			<b>Mo</b>	0.0073	0.0048	0.0065	75.22
			<b>Bi</b>	0.0180	0.0050	0.0137	87.78
3	+10-60	35.63	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.200	0.034	0.141	91.40
			<b>Mo</b>	0.0073	0.0035	0.0059	79.03
			<b>Bi</b>	0.0280	0.0050	0.0198	91.01
4	+10-60	39.56	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.250	0.030	0.163	92.72
			<b>Mo</b>	0.0073	0.0057	0.0067	66.17
			<b>Bi</b>	0.0220	0.0055	0.0155	85.94
5	+10-60	36.95	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.180	0.030	0.125	91.10
			<b>Mo</b>	0.0074	0.0038	0.0061	76.87
			<b>Bi</b>	0.0340	0.0076	0.0242	88.42

Mo=74,52%, Bi=89,52%. По результатам полупромышленных испытаний был разработан технологический регламент для проектирования цеха предварительного обогащения вольфрамовой руды Верхне-Кайрактинского месторождения.

Успешные испытания рентгеновской сепарации позволяют авторам с оптимизмом смотреть на перспективы освоения Верхне-Кайрактинского месторождения.

Исследование рентгеновской сепарации вольфрамовой руды также показывает, что китайские сепараторы не уступают аппаратам Томра Сортинг и даже превосходят их по некоторым параметрам (качество сепарации, производительность, цена,) вследствие большого опыта их применения на китайских вольфрамовых обогатительных фабриках.

# STUDIES AND TESTS OF X-RAY SEPARATION OF TUNGSTEN ORES OF UPPER KAIRAKTY DEPOSIT

*Kulmukhamedov G.K., Ligai A.B.*

North Katpar LLP, Karaganda, Republic of Kazakhstan

[gani.kulmuhamedov@skatpar.kz](mailto:gani.kulmuhamedov@skatpar.kz)

North Katpar LLP is a subsidiary of Tau-Ken Samruk National Mining Company JSC and holds the contract for the Upper Kairakty tungsten deposit. The deposit is one of the three largest tungsten deposits in the world with reserves of 1,200,000 tons of WO<sub>3</sub>. Development of the deposit is complicated due to low tungsten content in the ore (0.12-0.14% WO<sub>3</sub>). One of the technical solutions to improve the project performance is the introduction of a preliminary beneficiation operation into the ore processing procedure.

The first stage of research involved testing of X-ray luminescence, X-ray-radiometric and X-ray-absorption separation. The first method was tested on the basis of scientific and production enterprise "Burevestnik" (St. Petersburg); the second method - on the basis of Irgiredmet Institute JSC (Irkutsk); the third method - on the basis of Thrane *Teknikk* LLP, the authorized representative of Tomra Sorting Company. In order to compare the results objectively, all 3 tests were conducted on the same batch of ore.

Studies have shown that due to the natural features of the studied ore (chemical and mineral composition, textural and structural features) the best results are obtained using X-ray absorption technology.

XRT-device of TOMRA-company provided the best results in comparison with other methods. In the case of our ore, all its advantages played in its favor i.e. high X-ray density of tungsten, which provided contrast against the background of rock elements; full illumination of the ore piece, which allowed to detect individual grains of tungsten minerals inside the piece as well as the success of IT specialists in the artificial intelligence and machine learning technologies, which led to the development of a program for recognizing tungsten minerals from a monochromatic image.

Three major Chinese companies producing XRT separators were engaged to conduct Stage 2 i.e. Hao Peng Yu Technology (Ganzhou), Beijing Honest Technology (Beijing), Tianjin Meiteng Technology (Tianjin).

**Table 1**

Size class, mm	Tails yield,%		Content in concentrate, %		Content in tails,%		Recovery,%	
	Tomra	HPY	Tomra	HPY	Tomra	HPY	Tomra	HPY
-70+30	41,92	47,72	0,169	0,14	0,033	0,031	87,69	83,19
-30+15	65,86	51,15	0,275	0,23	0,058	0,035	71,13	86,26
-15+8	99,35	52,6	0,154	0,228	0,121	0,034	5,86	86,09
-8+0	Unsorted	Unsorted	0,235	0,235	Unsorted	Unsorted	100*	100*
Total	51,8	43,68	0,197	0,197	0,063	0,028	85,73	95,48

\*- grade (-8+0) mm was not sorted and combined with concentrate

In order to certify the results of Thrane *Teknikk* and to compare the separation performance, Hao Peng Yu Technology tested a duplicate of the sample tested earlier in Thrane *Teknikk* under comparable conditions. The results are summarized in Table 1.

As can be seen from the table, the HPY Classic 1400 separator performed significantly better for the fine size class -15+8mm, with comparable results for the larger classes. Successful separation of fine grades requires either a detector with a higher resolution (higher pixel density) or the use of a separation algorithm other than the Tomra algorithm.

Following Thrane *Teknikk*'s certification of the results, separation studies were carried out on the row, poor and off-balance ores of the deposit with results summarized in Table 2.

As can be seen from these data, all ore grades allow efficient X-ray sorting to obtain enriched product suitable for subsequent

flotation processing. As the tungsten content in the source ore decreases, the requirements to the content in the tailings and to the quality of separation become stricter in order to maintain high recovery. In order to obtain concentrate containing more than 0.2% WO<sub>3</sub> from poor and off-balance ores, concentrate refining is required.

The results for off-balance ores, the processing of which makes it possible to reduce the stripping ratio to 0.14t/t ore, significantly reduce the volume of stripping works at the deposit and increase tungsten reserves, providing raw materials for the operation of the future combine far beyond the current century, should be separately noted.

In order to find out the possibility of using X-ray separators of other manufacturers, the ore was tested on the devices of Beijing Honest Technology and Tianjin Meiteng Technology. The results are summarized in Table 3.

**Table 2**

Size class, mm	Content, %			Ejected tailings yield, %	Recovery, %
	Raw ore	Concentrate	Tails		
Off-balance ore					
+10-30	0,064	0,19	0,023	75,55	72,9
+30-60	0,066	0,109	0,014	45,68	90,37
Concentrate refining					
+10-30	0,16	0,22	0,03	84,19	72,86
+30-60	0,109	0,13	0,019	53,42	88,1
Ordinary ore					
+10-30	0,109	0,188	0,036	33,79	83,1
+30-60	0,127	0,181	0,027	40,87	92,44
Concentrate refining					
+10-30	0,188	0,24	0,043	64,21	78,11
+30-60	0,181	0,21	0,035	47,3	85,8

**Table 3**

Size class, mm	Content, %			Ejected tailings yield, %	Recovery, %
	Raw ore	Concentrate	Tails		
Beijing Honest Technology					
+10-60	0,128	0,19	0,02	36,2	94,36
Tianjin Meiteng Technology					
+10-30	0,125	0,182	0,021	35,55	94,02
+30-60	0,13	0,181	0,018		95,67

**Table 4 – contains the semi-industrial test results.**

Test No.	Size class, mm	Ejected tailings yield, %	Component	Content, %			Recovery %
				in concentrate	in tails	in raw ore	
1	+10-60	32,95	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.180	0.023	0.128	94.09
			<b>Mo</b>	0.0075	0.0049	0.0066	75.70
			<b>Bi</b>	0.0280	0.0040	0.0201	93.44
2	+10-60	33.38	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.140	0.026	0.102	91.49
			<b>Mo</b>	0.0073	0.0048	0.0065	75.22
			<b>Bi</b>	0.0180	0.0050	0.0137	87.78
3	+10-60	35.63	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.200	0.034	0.141	91.40
			<b>Mo</b>	0.0073	0.0035	0.0059	79.03
			<b>Bi</b>	0.0280	0.0050	0.0198	91.01
4	+10-60	39.56	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.250	0.030	0.163	92.72
			<b>Mo</b>	0.0073	0.0057	0.0067	66.17
			<b>Bi</b>	0.0220	0.0055	0.0155	85.94
5	+10-60	36.95	<b>WO<sub>3</sub></b>	0.180	0.030	0.125	91.10
			<b>Mo</b>	0.0074	0.0038	0.0061	76.87
			<b>Bi</b>	0.0340	0.0076	0.0242	88.42

As can be seen from Table 3, all the devices show approximately the same very good results. In view of the fine, unsorted grade of -10+0 mm, a recovery rate of more than 94% can be expected. The difference is in the different declared productivity of the separators, as well as in the tungsten content in the separation products, which is due to the peculiarities of the detector design and the algorithm of processing the X-ray image of the ore piece, the initial settings of the program.

Semi-industrial tests were carried out on a 37-tonne core sample of ordinary ore at the Hao Peng Yu Technology Research Center. The representativeness of the composite sample was ensured by the selection of drill hole locations within the project open pit based on detailed exploration data.

Tailings yield during the tests amounted to 35.79%; the content in concentrate  $WO_3=0.19\%$ , in tailings  $WO_3=0.029\%$ ; extraction of  $WO_3=92.18\%$ ,  $Mo=74.52\%$ ,  $Bi=89.52\%$ . According to the results of semi-industrial tests, the technological regulations for the

design of the Preliminary beneficiation Plant of Upper Kairakty tungsten ore were developed.

Successful tests of X-ray separation allow the authors to be optimistic about the prospects for the development of the Upper Kairakty deposit.

The study of X-ray separation of tungsten ore also shows that Chinese separators are not inferior to Tomra Sorting devices and even surpass them in some parameters (quality of separation, productivity, price) due to extensive experience of their application at Chinese tungsten concentrators.