

Научная статья

УДК 622.772

DOI: 10.26730/1999-4125-2022-4-67-75

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОТСАДОЧНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ
КОНТРОЛЬНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ НА ЗИФ

Лучко Максим Сергеевич

Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов АО
«Иргиредмет»

*для корреспонденции: maxuse@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

04 августа 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 августа 2022 г.

Принята к публикации:

31 августа 2022 г.

Ключевые слова:гравитационный метод
обогащения, центробежная
отсадочная машина,
обогащение золото-
содержащего сырья, полезные
ископаемые, добыча и
переработка сырья,
отвальные хвосты**Аннотация.**

В настоящей статье рассматривается применение отсадочного метода обогащения в центробежном поле при переработке золотосодержащих руд как одного из перспективных направлений развития гравитационного обогащения при переработке золотосодержащих руд. Данный метод является комбинированным и основан на наложении центробежного поля на процесс обогащения в стесненных условиях (отсадка). В статье приведена схема и описан принцип действия центробежной отсадочной машины ЦОМ-5 конструкции АО «Иргиредмет». Предложены области применения центробежно-отсадочного метода обогащения на золотоизвлекательных фабриках при переработке песков россыпных месторождений золота и других полезных ископаемых. Приведенные расчетные результаты извлечения золота из отвальных хвостовых продуктов на действующей золотоизвлекательной фабрике (до 92,12 г в сутки) показывают целесообразность и экономическую эффективность применения центробежных отсадочных машин для доизвлечения золота из отвальных хвостов. При этом оптимальные регулируемые технологические режимы работы ЦОМ-5 (частота вращения отсадочной камеры, частота и амплитуда пульсации подвижного днища и расход подрешетной воды) спрогнозированы при помощи математического моделирования. Содержание золота в отвальных хвостах при применении ЦОМ сократится на 30%, а окупаемость вновь возводимого цеха центробежно-отсадочного обогащения составит менее 1 года.

Для цитирования: Лучко М.С. Применение центробежной отсадочной машины для контрольного обогащения золотосодержащего сырья на ЗИФ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 4 (152). С. 67-75. doi: 10.26730/1999-4125-2022-4-67-75

Процессы гравитационного обогащения, в частности отсадка и центробежное обогащение, нашли широкое применение при обогащении золотосодержащих руд. К достоинствам гравитации относятся низкие капитальные и эксплуатационные затраты, экологическая «чистота» технологического процесса, сравнительно малая зависимость технологии от минерального состава сырья.

Отсадкой, как правило, извлекают свободное золото после первых стадий измельчения (из готового класса слива мельниц), а центробежные аппараты применяются для извлечения тонкого золота из измельченных до 0,1 мм и ниже продуктов.

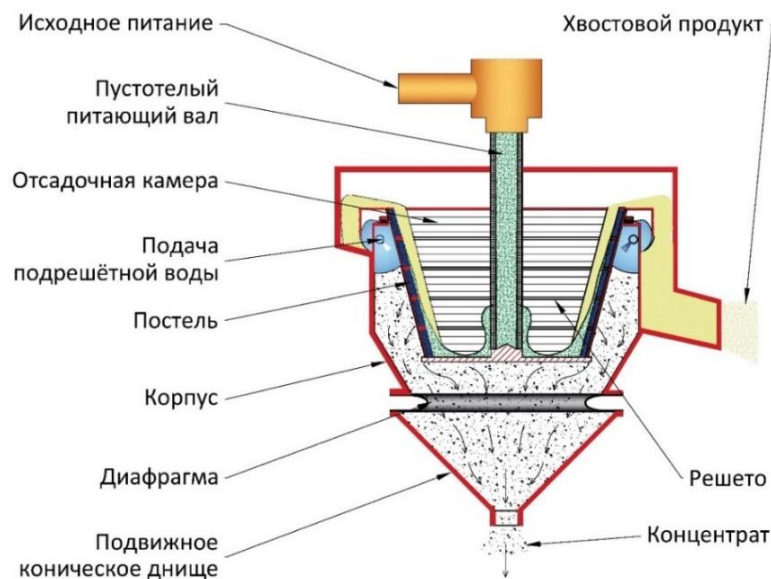


Рис. 1. Схема центробежной отсадочной машины ЦОМ-5
Fig 1. Scheme of the centrifugal jigging machine CJM-5

Таблица 1. Техническая характеристика центробежной отсадочной машины ЦОМ-5
Table 1. Technical characteristics of the centrifugal jigging machine CJM-5

Наименование параметра, единицы измерения	Значение параметра
Число отсадочных отделений, шт.	1
Рабочая площадь решета, м ²	0,97
Производительность по исходному питанию, т/ч, до	15
Крупность питания, мм, не более	10
Частота вращения отсадочной камеры, мин-1	47-400
Частота качаний подвижного конуса, мин-1	180-360
Длина хода подвижного конуса, мм	0-40
Мощность электродвигателя привода отсадочной камеры, кВт	15
Мощность электродвигателя привода подвижного конуса, кВт	7,5
Габаритные размеры, мм: длина	2250
ширина	1220
высота	2275
Масса машины, кг	1600

Одним из современных и перспективных методов гравитационного обогащения золотосодержащей руды является центробежно-отсадочный метод, позволяющий за счет комбинации сил, действующих на обогащаемый материал в условиях стесненного падения и наложения центробежного поля, эффективно извлекать в концентрат частицы полезного ископаемого средних и мелких классов с возможностью постоянного вывода концентрата [1, 16].

В АО «Иргиредмет» проведены заводские и опытно-промышленные испытания на золотоизвлекательных фабриках [5, 6] центробежной отсадочной машины (ЦОМ) производительностью по твердому до 15 т/ч.

Порядок работы ЦОМ следующий: продукт поступает в пустотелый вал отсадочной чаши и распределяется сначала по дну, а затем под воздействием вращения отсадочной чаши и возникающей центробежной силе по стенкам чаши. Подвижное днище машины, совершая возвратно-поступательные движения, передает пульсационный импульс пульпе и образующейся постели на внутренней поверхности чаши. Под действием пульсации постель постоянно находится в разрыхленном состоянии, способном эффективно пропускать через себя зерна минералов с высоким удельным весом (золота) и задерживать зерна с легким удельным весом (пустая порода). Концентрат разгружается через отверстие в подвижном днище, а хвосты – переливом через отсадочную камеру.

Таблица 2. Баланс выхода продуктов и извлечения золота по схеме 1
Table 2. Balance of product yield and gold recovery according to scheme 1

Наименование операции	Наименование продуктов	Номер продукта	Выход продукта (γ)			Извлечение Au в продукт (ε), %	Содержание Au в продукте (β), г/т	Масса Au, г/сут.
			т/сут	%				
				по операции	от исходного			
Обогащение на ЦОМ	Поступает:							
	Хв. ЗИФ	1	2644,98	99,816	97,86*	87,66	0,38	1005,09
	Хв. СКО II	8	4,53	0,171	0,168	2,61	0,38	29,95
	Хв. СКО III	10	0,35	0,013	0,004	9,73	317,45	111,51
	Итого	1+8+10	2649,86	100,00	98,031	100,00	0,38	1146,55
	Выходит:							
	К-т ЦОМ	2	254,39	9,60	9,411	35,20	1,39	354,45
	Хв. ЦОМ	3	2395,48	90,40	88,620	64,80	0,27	792,11
Обогащение на концентрационном столе ВУ4500х1800	Поступает:							
	К-т ЦОМ	2	254,39	100,00	9,411	100,00	1,39	354,45
	Выходит:							
	К-т СКО I	4	0,25	0,10	0,00941	48,12	670,47	170,56
	Пр.п. СКО	5	4,63	1,82	0,17128	18,46	14,13	65,43
	Хв.СКО	6	249,50	98,08	9,23	33,42	0,47	118,46
Перечистка на концентрационном столе ВУ2100х1050	Поступает:							
	Пр.п. СКО	5	4,63	100,00	0,17128	100	14,13	65,43
	Выходит:							
	К-т СКО II	7	0,10	2,10	0,0036	54,22	364,88	35,48
	Хв. СКО II	8	4,53	97,90	0,16768	2,613	0,38	29,95
Перечистка на концентрационном столе ВУ 1050х500	Поступает:							
	К-т СКО I	4	0,254		0,00941		670,47	170,56
	К-т СКО II	7	0,097		0,0036		364,88	35,48
	Итого:	4+7	0,352	100	0,01301	100	585,97	206,04
	Выходит:							
	Au	9	0,000	0,10	0,0000036	48,22	282555,84	99,35
	Хв. СКО III	10	0,351	99,90	0,003596	54,12	317,45	111,51
Обжиг и плавка	Поступает:							
	Au	9	0,000	100,00	0,0000036	100	282555,84	99,35
	Выходит:							
	Лиг. Au	11	0,000	99,89	0	95	268723,64	94,38
	Потери при плавке	12	0,000	0,11	0	5	12843447,21	4,97

*показатель меньше 100%, т.к. часть продукта выведена из процесса в предыдущих технологических пределах ЗИФ

Существует пропорция соотношения величины центробежной силы к частоте пульсации, позволяющая регулировать выход концентрата и его качество [7-9].

Центробежная отсадочная машина может быть применена в различных технологических пределах обогатительных фабриках, шлиходоводочных установках, драгах, при извлечении платины, олова, никеля, а также железной руды, неблагородных металлов, хромитов, циркона, ильменита, угля и др. [11-15]

Наиболее рациональными технологическими пределами для применения ЦОМ являются:

1. На золотоизвлекательных фабриках: контрольное обогащение сливов гидроциклонов; перечистка песков гидроциклонов, сливов спиральных сепараторов; предварительное обогащение исходного питания флотации, концентрационных столов; предварительное обогащение относительно крупного материала, до 10 мм, разгрузка мельниц.

2. На береговых обогатительных фабриках и драгах (обогащение россыпного золота и платины); доводка золотосодержащих концентратов; перечистка концентратов отсадочных машин.

3. При обогащении угля крупностью 150-300 мкН.

Таблица 3. Баланс выхода продуктов и извлечения золота по схеме 2
Table 3. Balance of product yield and gold recovery according to scheme 2

Наименование операции	Наименование продуктов	Номер продукта	Выход продукта (γ)			Извлечение Au в продукте (ε), %	Содержание Au в продукте (β), г/т	Масса Au, г/сут	
			т/сут	%					
				по операции	от исходного				
Обогащение на ЦОМ	Поступает:								
	Хв. ЗИФ	1	2644,98	100,00	97,86	100	0,38	1005,09	
	Выходит:								
	К-т ЦОМ I	2	253,92	9,60	9,39	39,20	1,55	394,00	
Контрольное обогащение на ЦОМ	Хв. ЦОМ I	3	2391,06	90,40	88,47	60,80	0,26	611,10	
	Поступает:								
	Хв. ЦОМ I	3	2391,06	100,00	88,47	100	0,26	611,10	
	Выходит:								
К-т ЦОМ II	4	229,54	9,60	8,49	39,20	1,04	239,55		
	Хв. ЦОМ II	5	2161,52	90,40	79,97	60,80	0,17	371,55	
	Перечистка на ЦОМ	Поступает:							
		К-т ЦОМ I	2	253,92	47,48	9,39	44,64	1,55	394,00
К-т ЦОМ II		4	229,54	42,92	8,49	27,14	1,04	239,55	
Хв. СКО I		10	50,36	9,42	1,86	13,10	2,30	115,62	
Хв. СКО II		12	0,91	0,17	0,03	3,31	31,96	29,24	
Хв. СКО III		13	0,07	0,01	0,00	11,80	1468,82	104,13	
Итого		2+4+10+12+13	534,80	100,00	19,79	100	1,65	882,53	
Выходит:									
К-т ЦОМ III		6	51,34	9,60	1,90	39,20	6,74	345,95	
Хв. ЦОМ III	7	483,46	90,40	17,89	60,80	1,11	536,58		
Обогащение на концентратном столе ВУ4500х1800	Поступает:								
	К-т ЦОМ III	6	51,34	100,00	1,90	100,00	6,74	345,95	
	Выходит:								
	К-т СКО I	8	0,05	0,10	0,00	48,12	3242,47	166,47	
	Пп. СКО I	9	0,93	1,82	0,03	18,46	68,35	63,86	
Перечистка на концентратном столе ВУ2100х1050	Хв. СКО I	10	50,36	98,08	1,86	33,42	2,30	115,62	
	Поступает:								
	П-п СКО I	9	0,93	100,00	0,0346	100	68,35	63,86	
	Выходит:								
	К-т СКО II	11	0,02	2,10	0,0007	54,22	1764,62	34,63	
Перечистка на концентратном столе ВУ 1050х500	Хв. СКО II	12	0,91	97,90	0,0338	45,78	31,96	29,24	
	Поступает:								
	К-т СКО I	8	0,05	72,35	0,0019	82,78	3242,47	166,47	
	К-т СКО II	11	0,02	27,65	0,0007	17,22	1764,62	34,63	
	Итого	8+11	0,07	100,00	0,0026	100	2833,82	201,10	
	Выходит:								
Обжиг и плавка	Au	12	0,00007	100,00	0,000002	100	1366470,21	96,97	
	Хв. СКО III	13	0,07	99,90	0,0019	51,78	1468,82	104,13	
	Поступает:								
Обжиг и плавка	Au	12	0,00007	100,00	0,000002	100	1366470,21	96,97	
	Выходит:								
	Лиг Au	14	0,00007	99,87		95	1299836,48	92,12	
	Потери при плавке	15	0,0000001	0,13	0,000000	5	52556546,44	4,85	

Таблица 4. Расчет операционной деятельности
Table 4. Calculation of operating activities

Показатель	Удельные значения, руб/т	Вариант схемы	
		I	II
Переработка первичной руды, тыс. т		912 518,10	912 518,10
Среднее содержание Au в руде, г/т		0,38	0,38
Сквозное извлечение Au, %		9,39	9,17
Товарное Au, кг		32 560,47	31 797,61
Цена Au, руб/г		4 254,90	4 254,90
Выручка от реализации Au, тыс. руб.		138 541 547,39	135 295 632,55
Эксплуатационные затраты (без амортизации):			
- ФОТ основных и вспомогательных рабочих по переделу, тыс. руб.		9 600 000,00	4 800 000,00
- Страховые взносы, тыс. руб.	30%	2 880 000,00	1 440 000,00
- электроэнергия, тыс. руб.		4 865 526,09	7 486 838,10
- содержание и ремонт оборудования, тыс. руб.	30%	12 599 575,30	10 332 000,00
- прочие затраты цеховые затраты, тыс. руб.	10%	2 994 510,14	2 405 883,81
Затраты на аффинаж, тыс. руб.	1,50%	2 078 123,21	2 029 434,49
НДПИ, тыс. руб.		8 187 805,45	7 995 971,88
Итого эксплуатационные затраты, тыс. руб.		43 205 540,19	36 490 128,28
Амортизация ОС, тыс. руб.		7 897 939,10	4 484 084,67
Полные эксплуатационные затраты (с учетом амортизации):		51 103 479,29	40 974 212,95
Валовая прибыль, тыс. руб.		87 438 068,10	94 321 419,60
Налог на имущество, тыс. руб.	2,20%	1 220 366,62	343 227,94
Прибыль до налогообложения, тыс. руб.		86 217 701,48	93 978 191,66
Налог на прибыль (20%), тыс. руб.	20%	17 243 540,30	18 795 638,33
Чистая прибыль, тыс. руб.		68 974 161,19	75 182 553,33
Сальдо от операционной деятельности, тыс. руб.		76 872 100,29	79 666 637,99

Таблица 5. Расчет инвестиционной деятельности
Table 5. Calculation of investment activity

Показатель	Вариант схемы	
	I	II
Капитальные вложения, в т. ч., тыс. руб.:	97 469 794,33	50 041 270
- строительство корпуса	55 471 210,00	15 601 270
- оборудование	41 998 584,33	34 440 000
Окупаемость, лет	1,41	0,67

4. При переработке титаносодержащих песков (ильменит, цирконий), как основной, контрольный и пересчетной обогатительный аппарат.

При испытаниях в промышленных условиях на ЗИФ исходным питанием ЦОМ являлся весьма труднообогатимый материал с крайне неблагоприятным вещественным составом – отвалы хвосты цианирования фабрики. Преобладающим размером минеральных зерен был класс крупности минус 0,125 мм – 92,7%, а выход наибольшего размера, класса крупностью +0,5 мм, составлял 0,02%. Содержание золота за время проведения исследований изменялось от 0,64 до 0,91 г/т. Учитывая, что исходная руда подвергалась многостадийному дроблению и обогащению, в том числе цианированию, можно говорить, что в хвостах ЗИФ свободное золото отсутствовало.

По полученным результатам исследований на опытно-промышленном образце ЦОМ конструкции АО «Иргиредмет» построены две математические модели, позволившие ранжировать по степени влияния на процесс обогащения регулируемые технологические параметры ЦОМ и определить их оптимальные значения [10].

При помощи математической модели прогнозируются следующие оптимальные регулируемые параметры ЦОМ: частота вращения отсадочной камеры – 240 мин⁻¹, частота колебаний подвижного днища – 300 мин⁻¹, амплитуда колебаний подвижного днища – 7,2 мм, извлечение золота в концентрат из отвальных хвостов – 35,2%. Используя прогнозируемые технологические показатели, произвели расчеты балансов выходов продуктов обогащения и извлечения золота из отвальных хвостовых продуктов ЗИФ по двух аппаратурным схемам (таблицы 2 и 3). В таблице 2 в качестве основного обогатительного оборудования выбрана центробежная отсадочная машина ЦОМ, а в качестве доводочного оборудования – концентрационные столы. В таблице 3 ЦОМ был принят как основной, контрольный и пересчетный обогатительный аппарат с доводкой концентратов на концентрационных столах.

Как видно из таблиц 2 и 3, дополнительное извлечение золота при применении концентрационных столов на всех стадиях пересчета позволит дополнительно извлекать 94,38 г золота в сутки или 32,5 кг в год, а при применении ЦОМ в качестве основного, контрольного и доводочного в первой стадии оборудования – 92,12 г и 31,7 кг соответственно.

В таблицах 4 и 5 приведены расчеты притока реальных денежных средств за период освоения и эксплуатации нового, вновь возводимого гравитационного цеха.

Как видно из таблицы 5, несмотря на более полное извлечение золота при применении ЦОМ только в основной операции обогащения с пересчетом его концентратов на СКО, с экономической стороны целесообразно осуществлять доизвлечение золота из хвостовых продуктов ЗИФ с применением ЦОМ в основной, контрольной и пересчетной операции с плавкой конечного концентрата в существующей плавке ЗИФ.

Выводы:

1. Расширена область применения извлечения золота методом отсадки в центробежное поле, который позволяет за счет комбинации сил, действующих на обогащаемый материал в условиях стесненного падения и наложения центробежного поля, эффективно извлекать в концентрат частицы полезного ископаемого средних и мелких классов крупности с возможностью постоянного его вывода.

2. Применение центробежно-отсадочного способа обогащения при извлечении золота, в том числе в сростках, может быть целесообразно даже на отвальных хвостах гравитации ЗИФ. Расчетное доизвлечение золота составило 92,12 г в сутки с уменьшением содержания золота в отвальных хвостах на 30%. Окупаемость вновь возводимого цеха гравитационного обогащения – менее 1 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лодейщиков В. В. Гравитационное обогащение, цианирование и флотация золотосодержащих руд // [Электронный ресурс] URL: <https://zolotodb.ru/article/10441> (21.07.2021)
2. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдунов А. Е. Гравитационно-флотационное обогащение золотосодержащей руды // Цветная металлургия. 2021, С. 4-15.
3. Бочаров В. А., Гурников А. В., Гурников В. В. Анализ процессов разделения золотосодержащих продуктов в концентраторах Knelson и Falcon SB* // Обогащение руд. 2002. №2. С. 17-21.
4. Ван Клик М., Парий А., Гродовский М. Инновационная чаша центробежного концентратора от компании Sepro Mineral Systems // Горный вестник Узбекистана. 2020. №4(83). С. 29-32.
5. Маньков В. М. Создание и внедрение технологий и высокопроизводительного износостойкого оборудования для извлечения золота мелких классов из руд и песков: Отчет о НИР // ОАО «Иргиредмет». Иркутск, 2000. 98 с.
6. Пат. № 2430784 РФ Б МПК В03В 5/32. Центробежно-отсадочный концентратор / В. М. Маньков, М. С. Лучко, С.А. Патрин. Заявл. 29.12.2009; опубл. 10.10.2011.
7. Tucker P. Modeling the Kelsey Centrifugal Jig. Mineral Engineering. 1995. Vol. 8. №3. Pp. 333-336.
8. Barbosa da Costa J. H., Delbony H. Junior. Concentracao de minerais com jigue Centrífugo Kelsey // II

Congresso de Pesquisa e Inovacao da Rede Norte Nordeste de Educacao Tecnológica Joao Pessoa — PB — 2007. URL: http://www.redenet.edu.br/publicacoes/arquivos/20080220_105615_MINE-004.pdf.

9. Лучко М. С., Федотов П. К. Исследование влияния технологических параметров на обогащение золотосодержащего сырья в центробежной отсадочной машине // Обогащение руд. 2022. №1(397). С. 21-26.

10. Лучко М. С., Федотов П. К., Лукьянов Н. Д. Построение и сравнение регрессионных моделей обогащения золотосодержащего сырья в центробежной отсадочной машине // Вестник ЗабГУ. 2022. №1(28). С. 31-39.

11. Косов В. В., Лившиц В.Н., Шахназаров А. Г. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). Экономика. М. : 2000. 421 с.

12. Qiang Dai Simulation of packed column jigging/URK: <https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1969&context=etd> (05.03.2021).

13. Gibson B., Wonyen D.G., Chehreh Chelgani S. A review of pretreatment of diasporic bauxite ores by flotation separation // Minerals Engineering. 2017. № 114. Pp. 64-73.

14. Алгебраистова Н. К., Бурдакова Е. А., Маркова А. С., Макшинин А.В. Обогащение благороднометалльного сырья на центробежных аппаратах // Цветные металлы. 2017. С. 18-22.

15. Nirlipta P. N., Bhatu K. P. Separation behavior of iron ore fines in Kelsey Centrifugal jig // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2013. Vol. 1. Pp. 85-89.

16. Батчер Г., Лапланте А.Р. Извлечение золота на месторождении Гранни Смит с применением отсадочной машины Келси J1800 // Academia. [Электронный ресурс]. URL: <http://academia.edu> (09.09.2020).

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Лучко Максим Сергеевич, ведущий инженер, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов АО «Иргиредмет» (664025, Россия, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38), mxuse@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Лучко Максим Сергеевич – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста, постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

APPLICATION OF A CENTRIFUGAL JIGGING MACHINE FOR UPGRADING OF GOLD-BEARING MATERIALS AT GOLD-PROCESSING PLANTS

Maksim S. Luchko

Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds JSC "Irgiredmet"

*for correspondence: maxuse@mail.ru



Article info

Submitted:

04 August 2022

Approved after reviewing:

30 August 2022

Accepted for publication:

31 August 2022

Keywords: gravity concentration, centrifugal jigging machine, gold-bearing material concentration, minerals, mining and processing, final tailings

Abstract.

The paper describes the application of jigging in a centrifugal field for the processing of gold-bearing ores as one of the promising methods of gold-bearing ore gravity concentration. The proposed integrated method is based on the combination of a centrifugal field and the process of concentration in confined space (jigging). The paper includes the flowsheet and the operation principles of the CJM-5 jigging machine developed by Irgiredmet. The authors suggest the possible applications of jigging in a centrifugal field at gold-processing plants, for processing placer gold and other minerals. The calculated recovery of gold from final tailings at an existing gold-processing plant (up to 92.12 g/day) shows the feasibility and economic benefits of centrifugal jigging machines for additional recovery of gold from final tailings. Also, the methods of mathematical modeling were used to predict the optimum adjustable process parameters of the CJM-5 operation (jig chamber rotational speed, pulsation frequency and vibration amplitude of a movable cone, underscreen-water flow rate). Gold content in final tailings can be reduced by 30 % using the CJM, while the payback period of centrifugal jigging facility construction will be less than 1 year.

For citation: Luchko M.S. Application of a centrifugal jigging machine for upgrading of gold-bearing materials at gold-processing plants. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2022; 4(152):67-75. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.26730/1999-4125-2022-4-67-75

REFERENCES

1. Lodejshnikov V.V. Gravitacionnoe obogashhenie, cianirovanie i flotacija zoloto-soderzhashhih rud [Jelektronnyj resurs] URL: <https://zolotodb.ru/article/10441> (21.07.2021)
2. Fedotov P.K., Senchenko A.E., Fedotov K.V., Burdunov A.E. Gravitacionno-flotacionnoe obogashhenie zolotosoderzhashhej rudy. *Cvetnaja metallurgija*. 2021. Pp. 4-15.
3. Bocharov V.A., Gurnikov A.V., Gurnikov V.V. Analiz processov razdelenija zoloto-soderzhashhih produktov v koncentratorah Knelson i Falcon SB*. *Obogashhenie rud*. 2002; 2:17-21.
4. Van Klik M., Parij A., Grodovskij M. Innovacionnaja chasha centrobezhnogo kon-centratora ot kompanii Sepro Mineral Systems. *Gornyj vestnik Uzbekistana*. 2020; 4(83):29-32.
5. Man'kov V.M. Sozdanie i vnedrenie tehnologij i vysokoproizvoditel'nogo izno-sostojkogo oborudovanija dlja izvlechenija zolota melkih klassov iz rud i peskov: Otchjot o NIR. «Irgiredmet» JSC. Irkutsk, 2000. 98 s.
6. Pat. № 2430784 RFb MPK V03V 5/32. Centrobezhno-otsadochnyj koncentrator / V.M. Man'kov, M.S. Luchko, S.A. Patrin. Zajavl. 29.12.2009; opubl. 10.10.2011.
7. Tucker P. Modeling the Kelsey Centrifugal Jig. *Mineral Engineering*. 1995; 8(3):333-336.
8. Barbosa da Costa J. H., Delbony H. Junior. Concentracao de minerais com jigue Cen-triifugo Kelsey. *II Congresso de Pesquisa e Inovacao da Rede Norte Nordeste de Educacao Tecnológica Joao Pessoa — PB — 2007*. URL: http://www.redenet.edu.br/publicacoes/arquivos/20080220_105615_MINE-004.pdf.
9. Luchko M.S., Fedotov P.K. Issledovanie vlijaniya tehnologicheskikh parametrov na obogashhenie zolotosoderzhashhego syr'ja v centrobezhnoj otsadochnoj machine. *Obogashhenie rud*. 2022; 1(397):21-26.
10. Luchko M.S., Fedotov P.K., Luk'janov N.D. Postroenie i sravnenie regressionnyh modelej obogashhenija zolotosoderzhashhego syr'ja v centrobezhnoj otsadochnoj machine. *Vestnik ZabGU*. 2022; 1(28):31-39.
11. Kosov V.V., Livshishh V.N., Shahnazarov A.G. Metodicheskie rekomendacii po ocenke jeffektivnosti investicionnyh proektov (vtoraja redakcija). *Jekonomika*. M.: 2000, 421.
12. Qiang Dai Simulation of packed column jigging/URK:

<https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1969&context=etd> (05.03.2021).

13. Gibson B., Wonyen D.G., Chehreh Chelgani S. A review of pretreatment of diasporic bauxite ores by flotation separation. *Minerals Engineering*. 2017; 114:64-73.

14. Algebraistova N.K., Burdakova E.A., Markova A.S., Makshinin A.V. Obogashhenie blagorodnometall'nogo syr'ya na centrobezhnyh apparatah. *Cvetnye metally*. 2017:18-22.

15. Nirlipta P. N., Bhatu K. P. Separation behavior of iron ore fines in Kelsey Centrifugal jig. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2013; 1:85-89.

16. Batcher G., Laplante A.R. Izvlechenie zolota na mestorozhdenii Granni Smit s primeneniem otsadochnoj mashiny Kelsi J1800. *Academia*. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://academia.edu> (09.09.2020).

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Maksim S. Luchko, lead engineer, Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds JSC "Irgiredmet" (664025, Russia, Irkutsk, Gagarin Boulevard, 38), maxuse@mail.ru

Contribution of the authors:

Maksim S. Luchko – review of relevant literature; conceptualization of research; data collection and analysis; conclusions; writing text, setting a research task; scientific management.

All authors have read and approved the final manuscript.

