Исследование способа повышения технологических показателей центробежной сепарации с пневматической турбулизацией

Морозов Ю. П.^{1*}, Пеньков П. М.¹, Дмитриев В. Т.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: gmf.opi@ursmu.ru

Реферат

Предмет и цель работы. Центробежные сепараторы широко используются для извлечения золота в течение последних нескольких десятилетий. Основным недостатком способа является большой расход воды, необходимый во время работы, что в свою очередь сказывается на повышении капитальных и эксплуатационных затрат. Поскольку вода становится все более важным ресурсом, исследование центробежной сепарации с турбулизацией воздухом имеет большое практическое значение. Целью данной работы является исследование способа повышения технологических показателей центробежной сепарации с пневматической турбулизацией с использованием циркуляционной концентрации.

Методология. Предлагаемый способ центробежной сепарации реализован в лабораторных условиях на искусственной смеси кварца крупностью $-0,1 \dots +0,01$ мм и порошка вольфрама крупностью $-0,023 \dots +0,02$ мм. Центробежную сепарацию осуществляли в лабораторном турбулизационном сепараторе К-200ВЛ, оснащенный пневматическим турбулизатором для турбулизации пристеночного слоя подаваемыми изнутри конуса струями сжатого воздуха. По окончании каждого опыта определяли выход концентрата и хвостов, массовую долю в них вольфрама, рассчитывали извлечение вольфрама в концентрат.

Выводы. Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности центробежной сепарации в режиме циркуляции легкой фракции. Центробежная сепарация с использованием циркуляционной концентрации позволяет увеличить извлечение частиц повышенной плотности в тяжелую фракцию и повысить качество тяжелой фракции, а использование пневматической турбулизации ведет к снижению удельного расхода воды.

Ключевые слова: центробежная сепарация; замкнутый цикл; циркуляция; турбулизация воздухом; искусственная смесь.

Введение. Одними из самых старых методов обогащения, основанных на разнице в плотности разделяемых минералов, являются гравитационные методы обогащения [1]. В настоящее время значительная часть металла в россыпях представлена мелким и тонким золотом, а в техногенных месторождениях в основном находится тонкое золото [2]. Применение центробежных аппаратов для обогащения минерального сырья связано с необходимостью более полного извлечения ценных компонентов из мелких и тонких классов крупности. Центробежные ускорения в десятки и сотни раз превышают ускорение свободного падения, что позволяет существенно снизить нижний предел крупности разделяемых минералов [3]. Гравитационные методы, применяемые для извлечения золота, основаны на разделении в центробежных потоках пульпы [4–9].

Гравитационные методы обогащения используются для разделения минералов различных размеров, форм и плотностей. Эти методы имеют преимущества по сравнению с другими методами разделения, такими как флотация и цианирование, которые являются дорогостоящими, загрязняющими окружающую среду и сложными в эксплуатации. Преимущества гравитационных методов включают в себя снижение капитальных и эксплуатационных затрат, а также меньшее за-

грязнение окружающей среды. Хотя гравитационные методы не могут полностью заменить некоторые процессы разделения, такие как флотация, они могут использоваться в качестве дополнения в технологических схемах. Гравитационное разделение имеет возможность извлечения тяжелых минералов, которые все еще остаются в хвостах флотации [10].

Центробежные сепараторы широко используются для извлечения золота в течение последних нескольких десятилетий [11]. Основным недостатком является большой расход воды, необходимый во время работы, что в свою очередь сказывается на повышении капитальных и эксплуатационных затрат [1,12]. Также в процессе работы центробежного сепаратора с легкой фракцией теряются частицы повышенной плотности. Это обусловлено вымыванием из конуса сепаратора частиц повышенной плотности, находящихся у поверхности пристеночного слоя [13].

Рис. 1. Технологическая схема центробежной сепарации при переработке четырех порций исходного питания

Fig. 1. Flow diagram of centrifugal separation with four portions of feedstock

В связи с этим возникает необходимость повышения извлечения ценных компонентов в центробежной сепарации при использовании ее в схеме циркуляционной концентрации [14]. Поскольку вода становится все более важным ресурсом, исследование центробежной сепарации с турбулизацией воздухом имеет большое практическое значение [1].

Методология и результаты исследования. С целью повышения эффективности показателей центробежной сепарации разработана технология, совмещающая центробежную сепарацию и циркуляционную концентрацию. Она включает: последовательную подачу порций исходного материала в виде пульпы; центробежную сепарацию порций с турбулизацией пристеночного слоя конуса изнутри конуса струями сжатого воздуха и циркуляцией легкой фракции в течение заданного времени с последующим удалением ее в хвосты; единовременную разгрузку

тяжелой фракции в концентрат с помощью смывной воды после переработки заданного количества порций.

Схема проведения опытов по центробежной сепарации при переработке четырех порций исходного питания представлена на рис. 1.

Эксперименты выполнены следующим образом.

Путем перемешивания заданного количества исходного питания с водой готовится порция пульпы с заданной массовой долей твердого, которая подается в операцию центробежной сепарации. При подаче сжатого воздуха в пневматические турбулизаторы происходит турбулизация воздухом пристеночного слоя пульпы. Частицы повышенной плотности за счет центробежной силы продвигаются в пристеночном слое из движущейся по поверхности конуса пульпы к поверхности конуса и накапливаются в пазах конуса.

Рис. 2. Схема цепей аппаратов для реализации центробежной сепарации по предлагаемому способу: 1 – зумпф; 2 – насос; 3 – центробежный сепаратор; 4 – переключатель потоков; 5 – компрессор для подачи сжатого воздуха

Fig. 2. Machine flow sheet for centrifugal separation according to the proposed method: 1 – sump; 2 – pump; 3 – centrifugal separator; 4 – flow switch; 5 – compressor for compressed air supply

Частицы повышенной плотности, которые не успели попасть в паза конуса, выносятся в легкую фракцию, которая возвращается в центробежный сепаратор. Циркуляция осуществляется в течение времени, при котором обеспечивается максимальное извлечение частиц повышенной плотности в паза конуса. Продолжительность циркуляции в каждом конкретном случае определяется экспериментально.

По истечении заданного времени циркуляции легкая фракция направляется в хвосты. Тяжелая фракция остается в пазах конуса центробежного сепаратора.

Далее последовательно, аналогично переработке первой порции, перерабатываются следующие порции исходного питания.

Предел количества перерабатываемых порций определяется значением массовой доли в пазах конуса частиц повышенной плотности, при котором происходит снижение извлечения этих частиц за счет увеличения их выноса в легкую фракцию. Для каждого исходного питания продолжительность циркуляции легкой фракции и количество перерабатываемых порций исходного питания определяются экспериментально.

По окончании переработки заданного количества порций исходного питания осуществляется разгрузка тяжелой фракции вымыванием из пазов конуса смывной водой в концентрат.

Таблица 1. Результаты центробежной сепарации в режиме циркуляции легкой фракции по известному и предлагаемому способам
Table 1. Results of centrifugal separation in the mode of light fraction circulation according to the existing method and the proposed method

Показатель, %	Количество циклов переработки порций исходного питания			
	1	2	3	4
<i>По известному способу (с гидравлической турбулизацией пристеночного слоя)</i>				
Выход концентрата	22,54	22,65	22,60	22,59
Массовая доля вольфрама в концентрате	3,99	4,07	4,08	4,08
Извлечение вольфрама в концентрат	90,12	92,21	92,25	92,26
<i>По предлагаемому способу (с пневматической турбулизацией пристеночного слоя)</i>				
Выход концентрата	23,19	23,77	23,01	22,99
Массовая доля вольфрама в концентрате	3,86	3,93	4,25	4,25
Извлечение вольфрама в концентрат	89,58	93,47	97,74	97,22

Схема цепей аппаратов, реализующая центробежную сепарацию по предлагаемому способу, представлена на рис. 2.

Предлагаемый способ центробежной сепарации реализован в лабораторных условиях на искусственной смеси кварца крупностью $-0,1 \dots +0,01$ мм и порошка вольфрама крупностью $-0,023 \dots +0,02$ мм. Плотность кварца 2650 кг/м^3 , плотность вольфрама $18\,000 \text{ кг/м}^3$.

Центробежную сепарацию осуществляли в лабораторном турбулизационном сепараторе К-200ВЛ 3, оснащенный пневматическим турбулизатором для турбулизации пристеночного слоя подаваемыми изнутри конуса струями сжатого воздуха.

В каждом опыте порции искусственной смеси массой 2000 г, содержащей 20 г вольфрама (1 %), в виде пульпы с массовой долей твердого 20 % подвергали центробежной сепарации при скорости вращения конуса 1100 мин^{-1} и давлении воздуха в пневматическом турбулизаторе 0,5 МПа.

Насос обеспечивал прохождение порций пульпы объемом 8,3 л через центробежный сепаратор за 20 секунд.

В опытах с циркуляцией легкой фракции количество циклов центробежной сепарации на одной порции составляло 1; 2; 3; 4.

Эксперименты осуществлялись следующим образом. Порцию искусственной смеси массой 2000 г и воду подавали в зумпф I с мешалкой для получения пульпы с массовой долей твердого 20 %.

Далее запустили центробежный сепаратор 3 в работу, с помощью частотного преобразователя установили частоту вращения вала с конусом 1100 мин^{-1} , подали сжатый воздух в пневматический турбулизатор компрессором 5. Давление воздуха в пневматическом турбулизаторе составляло 0,5 МПа. Затем из зумпфа 1 пульпу подавали насосом 2 в центробежный сепаратор 3 при переключателе потоков 4 в положение подачи легкой фракции центробежного сепаратора 3 в зумпф 1.

При подаче пульпы из зумпфа 1 в центробежный сепаратор 3 она под действием центробежной силы движется по поверхности конуса к его широкой части. С помощью воздуха из пневматического турбулизатора происходит турбулизация пристеночного слоя пульпы на поверхности конуса. Частицы повышенной плотности за счет центробежной силы продвигаются в пристеночном слое движущейся по поверхности конуса пульпы к поверхности конуса и накапливаются в пазах конуса.

Таблица 2. Результаты центробежной сепарации при переработке заданного количества порций по известному и предлагаемому способам
Table 2. Results of centrifugal separation with the preset amount of portions processing according to the existing method and the proposed method

Показатель, %	Количество порций исходного питания			
	1	5	10	15
<i>По известному способу (с гидравлической турбулизацией пристеночного слоя)</i>				
Выход концентрата	22,60	5,21	3,00	2,53
Массовая доля вольфрама в концентрате	4,08	17,70	29,58	32,47
Извлечение вольфрама в концентрат	92,21	92,24	88,75	82,15
<i>По предлагаемому способу (с пневматической турбулизацией пристеночного слоя)</i>				
Выход концентрата	23,01	5,29	3,08	2,60
Массовая доля вольфрама в концентрате	4,25	18,50	31,71	36,29
Извлечение вольфрама в концентрат	97,74	97,75	97,69	94,36

Частицы повышенной плотности, которые не успели попасть в пазы конуса, выносятся пульпой в легкую фракцию, которая через переключатель потоков 4, зумпф 1 и насос 2 возвращается в центробежный сепаратор 3.

По истечении заданного времени работы в замкнутом цикле переключатель потоков 4 направляет легкую фракцию в хвосты. После разгрузки легкой фракции в хвосты процесс осуществляли на следующих порциях исходного питания.

После переработки заданного количества порций прекратили подачу сжатого воздуха в пневматический турбулизатор и подали воду в водный турбулизатор при давлении 0,008 МПа, частоту вращения конуса с помощью частотного преобразователя установили 50 об/мин. Из пазов конуса водой из водных турбулизаторов вымывалась тяжелая фракция, которая самотеком направлялась в концентрат.

Выполнено сравнение показателей работы центробежного сепаратора при турбулизации пристеночного слоя воздухом (предлагаемый способ) и водой (известный способ).

По окончании каждого опыта определяли выход концентрата и хвостов, массовую долю в них вольфрама, рассчитывали извлечение вольфрама в концентрат. Результаты экспериментов по центробежной сепарации с циркуляцией легкой фракции по известному и предлагаемому способам приведены в табл. 1.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что совмещение циркуляции легкой фракции с пневматической турбулизацией пристеночного слоя обеспечивает более высокое извлечение в концентрат (97,7 %) по сравнению с совмещением

ем циркуляции легкой фракции с гидравлической турбулизацией пристеночного слоя (92,2 %).

Далее проведены эксперименты центробежной сепарации при переработке заданного количества порций по известному и предлагаемому способам. Реализована центробежная сепарация при переработке 1, 5, 10 и 15 порций исходного питания до смыва накопленной тяжелой фракции из пазов конуса в концентрат. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

В целом установлено, что предлагаемый способ центробежной сепарации по сравнению с известным способом обеспечивает более высокие показатели по качеству концентрата и извлечению вольфрама в концентрат. При этом предлагаемый способ центробежной сепарации реализован на материале с тонкими частицами повышенной плотности крупностью $-0,023...+0,01$ мм. Частицы такой крупности в известных центробежных сепараторах извлекаются неэффективно.

Анализ и обсуждение результатов. Сочетание турбулизации пристеночного слоя конуса центробежного сепаратора струями сжатого воздуха с циркуляцией легкой фракции обеспечивает высокое извлечение частиц повышенной плотности в тяжелую фракцию, а последовательная переработка заданного количества порций в режиме турбулизации пристеночного слоя конуса струями сжатого воздуха позволяет перерабатывать большее количество порций без потерь частиц повышенной плотности с легкой фракцией и получать за счет этого более высокое качество концентрата. Также применение пневматической турбулизации способствует сокращению используемой в процессе центробежной сепарации воды.

Вывод. Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности центробежной сепарации в режиме циркуляции легкой фракции. Центробежная сепарация с использованием циркуляционной концентрации позволяет увеличить извлечение частиц повышенной плотности в тяжелую фракцию и повысить качество тяжелой фракции, а использование пневматической турбулизации ведет к снижению удельного расхода воды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meng Zhou, Ozan Kökkılıç, Raymond Langlois, Kristian E. Waters. Size-by-size analysis of dry gravity separation using a 3-in. Knelson Concentrator // Minerals Engineering. 2016. Vol. 91. P. 42–54.
2. Ali Ghaffari, Akbar Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling // Minerals Engineering. 2017. Vol. 112. P. 57–67.
3. Чинова Н. Б. Повышение эффективности извлечения золота из труднообогатимых руд // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: матер. 9 Междунар. науч. школы молодых ученых и специалистов. 19–23 ноября 2012 г. М.: ИПКОН РАН, 2012. С. 402–406.
4. Морозов Ю. П. Теоретическое обоснование и разработка новых методов и аппаратов извлечения мелкодисперсных благородных металлов из руд техногенного сырья: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2001. 397 с.
5. Лопатин А. Г. Центробежное обогащение руд и песков. М.: Недра, 1987. 222 с.
6. Польшкин С. И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. М.: Недра, 1987. 428 с.
7. Зеленев В. И., Щендригин А. Н. Пути совершенствования технологии переработки золото- и серебросодержащих руд. М.: ВИЭМС, 1986. 40 с.
8. Кизевальтер Б. В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. М.: Недра, 1979. 295 с.
9. Багазеев В. К. Разработка россыпных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 1994. № 6. С. 122–136.
10. Ali Ghaffari, Akbar Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling // Minerals Engineering. 2017. Vol. 112. P. 57–67.
11. Морозов Ю. П. Анализ гравитационного разделения минералов в тесненных условиях движения // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 4. С. 93–98.
12. Ozan Kökkılıç, Ray Langlois, Kristian E. Waters. A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator // Minerals Engineering. 2015. Vol. 72. P. 73–86.
13. Пеньков П. М., Хамидулин И. Х. Исследования работы центробежного сепаратора при циркуляции легкой фракции // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. XXII Междунар. науч.-техн. конф. 19–20 апреля 2017 г. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2017. С. 148–150.

14. Хамидулин И. Х. Технологии извлечения золота с использованием циркуляционной концентрации: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2017. 125 с.

Поступила в редакцию 17 марта 2020 года

Сведения об авторах:

Морозов Юрий Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.ori@ursmu.ru

Пеньков Павел Михайлович – аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: paha_ori@mail.ru

Дмитриев Владимир Трофимович – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации горного оборудования Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.ego@m.ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-62-69

Investigating the method of improving technological parameters of centrifugal separation with pneumatic turbulization

Iurii P. Morozov¹, Pavel M. Penkov¹, Vladimir T. Dmitriev¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aim and subject. In the last few decades centrifugal separators have been widely used to extract gold. Large water consumption essential in the course of operation is the basic drawback of the method, which in its turn results in increased capital and operational expenditure. As soon as water is becoming increasingly more important resource, the study of centrifugal separation with air turbulization is of great practical significance. The aim of the present research is to study the method of improving technological parameters of centrifugal separation with the use of circulation concentration.

Methodology. The proposed method of centrifugal separation has been realized in laboratory conditions at artificial quartz with grain size range of 0.1...+0.01 mm and tungsten powder with grain size range of 0.023...+0.02. Centrifugal separation has been carried out in a laboratory turbulization separator K-200VL equipped with a pneumatic mixing baffle for near-wall layer turbulization with compressed air streams delivered from inside the cone. On completion of each test, concentrate and tailings output has been determined as well as the mass fraction of tungsten within them; tungsten extraction to concentrate has been calculated.

Summary. The obtained data prove high effectiveness of centrifugal separation in the mode of light fraction circulation. Centrifugal separation with the use of circulation concentration makes it possible to increase extraction of high-density particles to heavy fraction and increase the quality of heavy fraction, while the use of pneumatic turbulization leads to specific water consumption reduction.

Key words: centrifugal separation; closed cycle; circulation; air turbulization; artificial mixture.

REFERENCES

1. Meng Zhou, Ozan Kökkılıç, Raymond Langlois, Kristian E. Waters. Size-by-size analysis of dry gravity separation using a 3-in. Knelson Concentrator. *Minerals Engineering*. 2016; 91: 42–54.
2. Ali Ghaffari, Akbar Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling. *Minerals Engineering*. 2017; 112: 57–67.
3. Chinova N. B. Improving the effectiveness of gold extraction from complex ore. In: *Young scientists' impression of the problems of mineral resources exploitation in the 21st century: proceedings of the 9th International Scientific Training of Young Scientists of Experts, 19–23 November 2012*. Moscow: IPKON RAN Publishing; 2012. p. 402–406. (In Russ.)
4. Morozov Iu. P. *Theoretic rationale and development of new methods and devices of finely dispersed precious metals extraction from the ore of technogenic raw material*. DSc in Engineering diss. Ekaterinburg; 2001. (In Russ.)
5. Lopatin A. G. *Centrifugal concentration of ore and sand*. Moscow: Nedra Publishing; 1987. (In Russ.)
6. Polkin S. I. *Concentration of ore and rare and precious placer metals*. Moscow: Nedra Publishing; 1987. (In Russ.)
7. Zelenov V. I., Shchendrigin A. N. *Ways of improving the technology of processing gold and silver-bearing ore*. Moscow: VIEMS Publishing; 1986. (In Russ.)
8. Kizevalter B. V. *Theoretical fundamentals of gravity processes of concentration*. Moscow: Nedra Publishing; 1979. (In Russ.)
9. Bagazeev V. K. Places mine development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 1994; 6: 122–136. (In Russ.)

10. Ali Ghaffari, Akbar Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling. *Minerals Engineering*. 2017; 112: 57–67.

11. Morozov Iu. P. Analysis of mineral gravity separation in constraint environment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2011; 4: 93–98. (In Russ.)

12. Ozan Kökkılıç, Ray Langlois, Kristian E. Waters. A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator. *Minerals Engineering*. 2015; 72: 73–86.

13. Penkov P. M., Khamidulin I. Kh. Study of centrifugal separator operation under light fraction separation. In: *Scientific fundamentals and practice of ore and technogenic raw material processing: proceedings of the 22nd International sci.-pract. conf., 19–20 April 2017*. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publishing; 2017. p. 148–150. (In Russ.)

14. Khamidulin I. Kh. *Technologies of gold extraction with the use of circulation concentration: PhD in Engineering diss.* Ekaterinburg; 2017. (In Russ.)

Received 17 March 2020

Information about authors:

Iurii P. Morozov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru

Pavel M. Penkov – PhD student, Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: paha_opi@mail.ru

Vladimir T. Dmitriev – DSc (Engineering), professor of Mining Equipment Exploitation Department, the Ural State Mining University. E-mail: gmf.ego@m.ursmu.ru

Для цитирования: Морозов Ю. П., Пеньков П. М., Дмитриев В. Т. Исследование способа повышения технологических показателей центробежной сепарации с пневматической турбулизацией // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 62–69. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-62-69

For citation: Morozov Iu. P., Penkov P. M., Dmitriev V. T. Investigating the method of improving technological parameters of centrifugal separation with pneumatic turbulization. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 62–69 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-62-69