

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СЕПАРАЦИИ НА ОСНОВЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛИЗАЦИИ ПРИСТЕНОЧНОГО СЛОЯ КОНУСА СЕПАРАТОРА

П. М. Пеньков¹, Ю. П. Морозов¹, И. Х. Хамидулин¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Использование центробежных сепараторов широко распространено при переработке руд и техногенного сырья, имеющих в своем составе тонкие частицы благородных металлов повышенной плотности. Центробежные сепараторы обеспечивают высокие показатели разделения частиц различной плотности при переработке полезных ископаемых по сравнению с другими методами переработки. При использовании центробежных сепараторов в промышленности не всегда удается достичь требуемых результатов по конечным продуктам центробежной сепарации. Множество параметров, характерных для центробежных сепараторов, создают проблемы при определении оптимального режима работы аппарата. Помимо этого, большой расход воды негативно сказывается на эксплуатационных и экологических затратах при переработке материала. В связи с этим требуется детальное изучение процесса сегрегации материала в пристеночном слое конуса центробежного сепаратора. Использование сжатого воздуха в центробежных сепараторах для турбулизации пристеночного слоя изнутри конуса отличается по своему принципу действия от использования воды. При использовании воздуха для турбулизации пристеночного слоя уменьшается сопротивление движению минеральных частиц по сравнению с водой, что в свою очередь ведет к повышению показателей центробежной сепарации. Использование сжатого воздуха для турбулизации пристеночного слоя конуса сепаратора позволяет реализовывать циркуляционно-накопительную технологию переработки минерального и техногенного сырья с целью увеличения извлечения тонкодисперсных частиц повышенной плотности.

Ключевые слова: центробежная сепарация, гравитационное обогащение, техногенное сырье, благородные металлы, частицы повышенной плотности, замкнутый цикл, циркуляция, турбулизация пристеночного слоя

Для цитирования: Пеньков П. М., Морозов Ю. П., Хамидулин И. Х. Совершенствование центробежной сепарации на основе пневматической турбулизации пристеночного слоя конуса сепаратора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12–1. – С. 120–133. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_120.

Improvement of centrifugal separation on the basis of pneumatic turbulization of separator cone wall layer

P. M. Penkov¹, Yu. P. Morozov¹, I. Kh. Khamidulin¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: The use of centrifugal separators is widespread in the processing of ores and technogenic raw materials, which contain fine particles of noble metals with increased density. Centrifugal separators provide high separation rates of particles of different densities in the processing of minerals compared to other methods of processing. When using centrifugal separators in industry, it is not always possible to achieve the desired results in terms of the final products of centrifugal separation. Many parameters characteristic of centrifugal separators create problems in determining the optimum mode of operation of the apparatus. In addition, the high water consumption has a negative impact on the operating and environmental costs of material processing. This calls for a detailed study of the segregation of material in the near-wall layer of the centrifugal separator cone. In centrifugal separators, the use of compressed air to turbulence the boundary layer from inside the cone is different from the use of water. The use of air to turbulate the boundary layer decreases the resistance to the flow of mineral particles compared to water, which in turn leads to an increase in centrifugal separation. The use of compressed air for turbulization of the near wall layer of the separator cone allows to realize the circulation and accumulation technology of mineral and technogenic raw materials processing in order to increase the extraction of finely dispersed particles of high density.

Key words: centrifugal separation, gravity concentration, technogenic raw materials, noble metals, high-density particles, closed cycle, circulation, turbulization of the near-wall layer.

For citation: Penkov P.M., Morozov Yu.P., Khamidulin I.Kh. Improvement of centrifugal separation on the basis of pneumatic turbulization of separator cone wall layer. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):120–133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_120.

Введение

Основа гравитационного разделения минералов — это различие минералов по плотности. Гравитационные методы обогащения существуют уже не один десяток лет и находят широкое применение при переработке золотосодержащих руд [1, 2]. Состояние сырьевой базы цветных металлов на текущий момент времени подразумевает вовлечение в переработку труднообогатимых руд, в которых содержатся тонковкрапленные рудные минералы. Данные руды порой соответствуют отвальному типу руд. Помимо этого, стоит учитывать, что новые месторождения, вводимые в эксплуатацию, находятся в неосвоенных районах, в условиях дефицита воды и прочих ресурсов [3, 4]. При этом экологические требования, предъявляемые к технологии переработки месторождений, остаются на высоком уровне. Применение флотационного или гидрометаллургического передела подразумевает использование раз-

личных химических соединений, что в свою очередь оказывает негативное воздействие на окружающую среду [5].

Независимо от того, что гидрометаллургические процессы и флотация оказывают негативное влияние на окружающую среду, они так же широко применяются, как и магнитная и электрическая сепарации. Несмотря на это, гравитационные методы обогащения продолжают быть актуальными и предпочтительными с непрерывно совершенствующимися технологическими схемами, способными обеспечить высокие показатели технологического процесса и не оказывать пагубного влияния на окружающую среду [6–11].

Большим недостатком известных центробежных сепараторов является повышенный расход турбулизирующей воды. Так, в сепараторах Knelson, FALCON, «Итомак» расход турбулизирующей воды достигает 5–10 м³/т перерабатываемого материала [12], в турбулизирующих сепараторах серии «К»

производства ООО «Таилс КО», в которых турбулизация пристеночного слоя осуществляется изнутри конуса, расход воды на турбулизацию составляет 3–5 м³/т перерабатываемого материала. Использование большого количества воды, необходимой для процесса центробежной сепарации, влечет за собой экологическую нагрузку на компоненты окружающей среды [13, 14].

С целью снижения расхода воды в процессе центробежной сепарации, а вследствие этого — возможности применения циркуляции легкой фракции центробежного сепаратора, нами предложено осуществлять турбулизацию пристеночного слоя конуса струями сжатого воздуха, подаваемого с помощью пневматических турбулизаторов изнутри конуса.

Газоструйное аэрирование жидкости исследовано применительно к процессам флотации. Показано, что при больших расходах воздуха (более 3 м³/мин) воздух прорывается из насадки в форме сплошной струи и диспергируется в жидкой фазе за счет турбулентного характера движения [15]. Скорость воздушной среды из сопла диаметром 0,3–5 мм при давлении на выходе от 0,1 до 0,6 МПа находится в пределах до 400 м/с.

Отмечается, что струйное истечение газа в жидкость отличается весьма сложным характером. При достаточно больших скоростях истечения газа в жидкость образуется значительный факел, который дробится на пузырьки и превращается в поток газожидкостной смеси [16, 17].

Известны попытки использования сжатого воздуха для перемешивания материала в пристеночном слое и в пазах конуса центробежного сепаратора. Так, в [18] предложено в качестве разрыхляющей среды использовать размещенные в канавках между нариф-

лениями эластичные трубки, в которые периодически подается сжатый воздух.

Деформация материала происходит за счет воздействия периодически растягивающимися и сжимающимися эластичными трубками. В данном способе сжатый воздух воздействует на материал в пристеночном слое опосредствованно, без личного контакта с турбулизирующим материалом.

Непосредственное использование воздуха для турбулизации пристеночного слоя предложено в [19], где разрыхление материала осуществляется потоком разрыхляющей воды и воздуха, подаваемым в межрифельное пространство при соотношении от 1:1 до 1:4.

Очевидно, что для эффективного использования турбулизации пристеночного слоя струями сжатого воздуха требуется дальнейшее изучение механизма процессов истечения сжатого воздуха из сопла, динамики изменения объемных и скоростных характеристик воздушного факела, условий создания необходимого давления струи сжатого воздуха на материал пристеночного слоя, характеристик диспергирования воздуха на пузырьки и выделения пузырьков из пристеночного слоя.

Методика исследований

Механизм турбулизации пристеночного слоя сжатым воздухом существенно отличается от механизма турбулизации водой. Главным отличием является то, что вода является практически несжимаемой средой, в то время как воздух при повышении давления сжимается, а при снижении давления расширяется.

При диспергировании струи сжатого воздуха образуется турбулизованный струями воздуха пристеночный слой. Толщина турбулизованного слоя зависит от количества поступающего

в пристеночный слой воздуха и может изменяться путем изменения давления воздуха на выходе из сопла [20].

Пузырьки воздуха в пристеночном слое за счет сброса давления увеличиваются в объеме. Аэрированность материала в пристеночном слое возрастает.

При выходе элементарного объема $V_{эл}$ из зоны действия сжатого воздуха происходит интенсивное выдавливание пузырьков воздуха движущимся под действием центробежной силы материалом пристеночного слоя. На пузырьки в пристеночном слое действует выталкивающая сила, аналогичная Архимедовой силе, обусловленная действием центробежной силы. Пузырьки при выходе из пристеночного слоя осуществляют его интенсивное перемешивание [21].

В режиме создания псевдооживленного пульсирующего состояния пристеночного слоя струи воздуха в периоды турбулизации поступают в аэрированный пристеночный слой, в кото-

ром легче и глубже проникают внутрь пристеночного слоя. Данный режим турбулизации обеспечивает постоянное и беспрепятственное продвижение частиц повышенной плотности вглубь пристеночного слоя вращающегося конуса турбулизационного сепаратора. В процессе многократной турбулизации пристеночного слоя достигается динамическое равновесие, когда количество поступающего в пристеночный слой воздуха будет равно количеству выходящего из него воздуха. Теоретически для достижения одних и тех же результатов турбулизации (по сравнению с турбулизацией водой) давление воздуха в связи с его низкой плотностью должно быть на 1,5–2 порядка выше.

Проведено экспериментальное сравнение показателей турбулизации столба воды струями воды и воздуха. Эксперименты выполнены на установке, общий вид и фотография которой приведены на рис. 1.

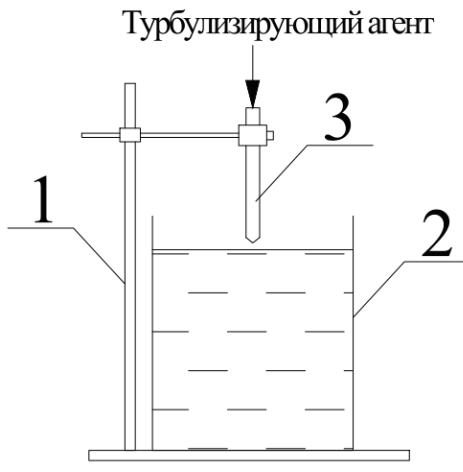


Рис. 1. Общий вид (а) и фотография (б) установки для изучения турбулизации воды струями воды и сжатого воздуха

Fig. 1. General view (a) and photo (b) of the setup for studying water turbulization by water jets and compressed air

Установка состоит из штатива 1, прозрачной емкости с водой 2 с нанесенной на ее стенку размерной шкалой, и турбулизатора 3. В качестве турбулизатора использовались трубки с диаметром выходного отверстия 0,8 и 1 мм. Давление турбулизирующего агента в экспериментах составляло для воды 0,08 МПа, для воздуха 0,2; 0,4; 0,6 МПа. В качестве критерия турбулизации воды использовали глубину проникновения турбулизирующего агента в воду в установившемся режиме турбулизации.

Схема процесса турбулизации приведена на рис. 2.

Величину проникновения турбулизирующего агента в воду H_1 определяли путем замеров с помощью размерной шкалы, нанесенной на боковую стенку прозрачной емкости с водой.

Эксперименты в каждом режиме турбулизации проводили по три раза. После математической обработки

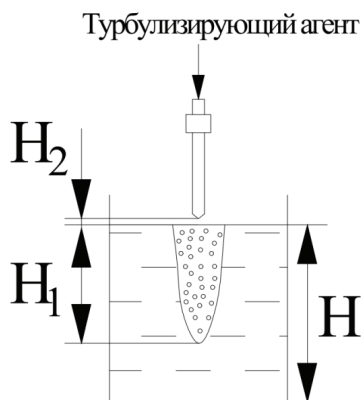


Рис. 2. Схема процесса турбулизации воды: H – глубина воды, м; H_1 – глубина проникновения турбулизирующего агента, м; H_2 – расстояние от турбулизатора до поверхности воды, м

Fig. 2. Schematic diagram of the water turbulence process: H – water depth, m; H_1 – depth of turbulizing agent penetration, m; H_2 – distance from turbulator to water surface, m

результаты приведены на рис. 3 в виде зависимостей глубины турбулизации от давления турбулизирующего агента. Относительная ошибка, рассчитанная по критерию Стьюдента, составила менее 3%.

Результаты

Чем меньше давление турбулизирующего агента, тем меньше глубина турбулизации H_1 . Одинаковые результаты по глубине турбулизации воздухом достигаются при давлении в 2,5–5 раз выше, чем при турбулизации водой.

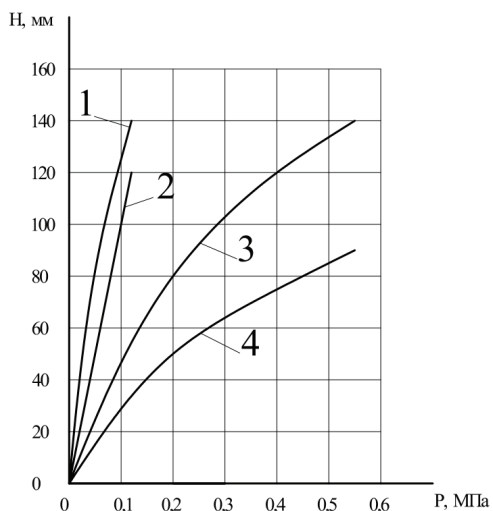


Рис. 3. Зависимости глубины турбулизации H_1 от давления турбулизирующего агента P на выходе из турбулизатора: 1 – турбулизация водой при диаметре турбулизатора 1 мм; 2 – турбулизация водой при диаметре турбулизатора 0,8 мм; 3 – турбулизация воздухом при диаметре турбулизатора 1 мм; 4 – турбулизация воздухом при диаметре турбулизатора 0,8 мм

Fig. 3. Dependences of turbulization depth H_1 on turbulizing agent pressure P at the outlet from the turbulizer: 1 – water turbulization at diameter of turbulizer 1 mm; 2 – water turbulization at diameter of turbulizer 0,8 mm; 3 – air turbulization at diameter of turbulizer 1 mm; 4 – air turbulence with turbulent diameter of 0,8 mm

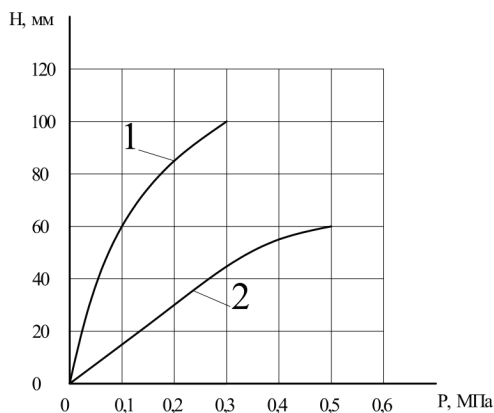


Рис. 4. Зависимости глубины турбулизации слоя кварца в воде H_1 от давления P на выходе из турбулизатора: 1 – турбулизация водой; 2 – турбулизация сжатым воздухом

Fig. 4. Dependences of quartz layer turbulization depth in water H_1 on pressure P at the outlet of the turbulizer: 1 – turbulization by water; 2 – turbulization with compressed air

Аналогично выполнено сравнение показателей турбулизации помещенного в воду слоя кварца крупностью $-1,25+0,071$ мм. Турбулизация осуществлялась через турбулизаторы с внутренним диаметром 1 мм. Опыты в каждом режиме повторялись 5 раз. После математической обработки результаты эксперимента приведены на рис. 4 в виде зависимостей глубины турбулизации H_1 от давления P на выходе из турбулизатора. Относительная ошибка значений составила менее 3,5%.

Установлено, что одинаковые результаты турбулизации слоя кварца на глубину 60 мм достигаются при турбулизации водой при давлении 0,1 МПа, а при турбулизации сжатым воздухом – при давлении 0,5 МПа.

Одинаковый результат турбулизации сжатым воздухом по сравнению с турбулизацией водой достигается при увеличении давления по сравнению с давлением воды всего лишь в 4–5 раза, поэтому можно считать, что

действует эффект аэрации турбулизируемого материала пузырьками воздуха, которая уменьшает плотность турбулизируемого материала для последующих порций турбулирующего агента и увеличивает за счет этого глубину турбулизации.

Обсуждение результатов

Наличие в пристеночном слое воздушных пузырьков, которые интенсивно вытесняются из пристеночного слоя, создает вероятность выноса частиц золота пузырьками воздуха за счет флотационного эффекта [22–24]. Для реализации процесса флотации частицы должны быть гидрофобизированы, должны быть созданы условия для закрепления гидрофобизированных частиц на пузырьках и для выделения флотокомплексов без отрыва частиц от пузырьков [25, 26].

При встречном движении частица и пузырек вступают в контакт, частица за счет центробежной силы и огибающих пузырек потоков пристеночного слоя движется по поверхности пузырька к кормовой части.

Для образования флотокомплекса частица должна преодолеть энергетический барьер границы раздела жидкой и газовой фаз на поверхности [27]. Как в любом флотационном процессе, при достаточно высокой гидрофобности частицы её закрепление на пузырьке в пристеночном слое возможно. Условием выноса частицы в образовавшемся флотокомплексе является превышение величины удерживающих частицу сил над величиной отрывающих сил.

На рис. 5 показана схема сил, действующих на закрепившуюся на пузырьке частицу в пристеночном слое.

Удерживают частицу на пузырьке в пристеночном слое флотационная

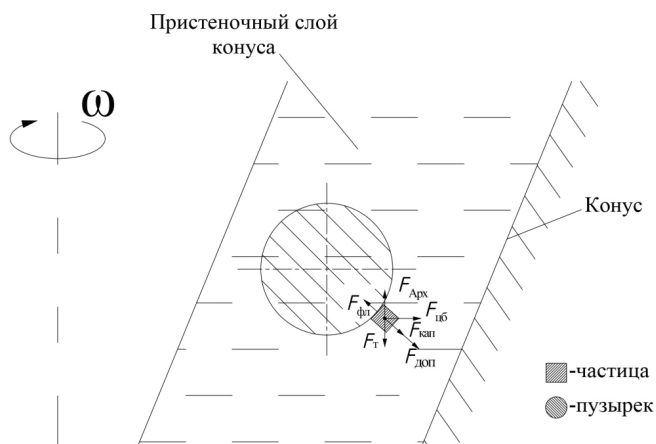


Рис. 5. Схема сил, действующих на закрепившуюся на пузырьке частицу в пристеночном слое
Fig. 5. Schematic of forces acting on the particle fixed on the bubble in the near wall layer

сила $F_{\text{фл}}$ и Архимедова сила F_A . Отрывают частицу от пузырька силы тяжести F_T , капиллярная сила $F_{\text{кап}}$ и дополнительные силы отрыва $F_{\text{доп}}$, обусловленные воздействием на частицу среды, в которой движется флотокомплекс, и центробежной силой $F_{\text{цб}}$.

Флотационная сила $F_{\text{фл}}$ действует по длине трехфазного периметра смачивания $L_{\text{п}}$ и определяется суммой удельных флотационных сил $F_{\text{фл}i}$. Удельная флотационная сила $F_{\text{фл}i}$, действующая на единицу длины трехфазного периметра смачивания,

$$F_{\text{фл}i} = \sigma_{\text{жг}} \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{жг}}$ — удельное поверхностное натяжение на границе раздела жидкой и газовой фаз, Н/м; θ — краевой угол смачивания, град.

Флотационная сила $F_{\text{фл}}$ определяется суммой значений удельной флотационной силы $F_{\text{фл}i}$ по длине трехфазного периметра $L_{\text{п}}$:

$$F_{\text{фл}} = L_{\text{п}} \cdot \sigma_{\text{жг}} \cdot \sin \theta; \quad (2)$$

Архимедова сила F_A определяется по формуле

$$F_A = V_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g, \quad (3)$$

где $V_{\text{ч}}$ — объем частицы, м^3 ; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; g — ускорение свободного падения, равное $9,8 \text{ м}/\text{с}^2$.

Сила тяжести F_T определяется по формуле

$$F_T = V_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частицы, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Капиллярная сила воздействует на границу раздела твердой и газовой фаз и проявляется при воздействии капиллярного давления газа внутри пузырька. Капиллярная сила определяется по формуле

$$F_{\text{кап}} = S_{\text{кап}} \cdot P_{\text{кап}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{кап}}$ — площадь контакта границы раздела фаз твердое — газ, м^2 ; $P_{\text{кап}}$ — капиллярное давление внутри пузырька, Па.

Значение капиллярного давления $P_{\text{кап}}$ определяется из уравнения Лапласа, Па:

$$P_{\text{кап}} = \sigma_{\text{жг}} \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (6)$$

где $\sigma_{жг}$ — удельное поверхностное натяжение на границе раздела жидкой и газовой фаз, Н/м; r_1 и r_2 — главные радиусы кривизны поверхности пузырька, м.

С учетом влияния гидростатического давления жидкости на пузырек высотой $h_{п}$ капиллярное давление $P_{кап}$ уменьшится и составит

$$P_{кап} = \sigma_{жг} \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) - h \cdot \rho_{ж} \cdot g. \quad (7)$$

Дополнительные отрывающие силы $F_{доп}$ обусловлены инерцией движения частиц, возникновением центробежных полей при криволинейном движении, трением движущихся флотокомплексов о пульпу, возникновением турбулентных вихрей на корме движущегося пузырька.

В процессе флотации за счет действия дополнительных сил отрыва частиц от пузырьков максимальная крупность частиц составляет для сульфидных минералов плотностью 4000–5000 кг/м³ 6–20 мкм. Для частиц золота из-за высокой плотности (18000 кг/м³) максимальная крупность флотируемых частиц значительно меньше максимальной крупности флотируемых частиц сульфидных минералов [28].

В пристеночном слое турбулизационного центробежного сепаратора дополнительной силой отрыва является центробежная сила $F_{цб}$:

$$F_{цб} = V_{ч} \cdot \rho_{ч} \cdot g_{цб}. \quad (8)$$

Для сохранения флотокомплекса при его движении должно быть выполнено следующее условие:

$$F_{фл} + F_A > F_T + F_{кап} + F_{доп} + F_{цб}. \quad (9)$$

В связи с высокой скоростью вращения конуса центробежного сепаратора ($g_{цб} = (50-100g)$)

$$F_{цб} \gg F_{доп}, \quad (10)$$

следовательно, крупность частиц, способных удержаться на пузырьке, значительно ниже по сравнению с максимальной крупностью флотируемых частиц в процессах флотации.

Для рассмотренных при моделировании частиц золота крупностью 10 мкм сумма отрывающих частицу от пузырька сил значительно выше удерживающих частицу на пузырьке сил, следовательно, флотационное выделение частиц золота выходящими из пристеночного слоя пузырьками воздуха в процессе турбулизационной центробежной сепарации маловероятно.

Экспериментальные исследования метода пневматической турбулизации пристеночного слоя выполнены на установке, схема цепей аппаратов которой приведена на рис. 6.

Установка включает центробежный сепаратор К-200ВЛ 3 с пневматической турбулизацией пристеночного слоя конуса, зумпф 1 с насосом 2, переключатель потоков 4 и компрессор 5 для подачи сжатого воздуха.

На установке реализуется циркуляционно-накопительная технология, заключающаяся в обеспечении максимального извлечения золота за счет циркуляции легкой фракции через сепаратор и заданного качества концентрата за счет накопления золота при последовательной переработке большого количества порций исходного питания с одновременной разгрузкой тяжелой фракции после пропускания заданного количества порций.

Исследования выполнены на искусственной смеси металлического вольфрама крупностью -20+10 мкм с кварцем крупностью -100+10 мкм. Использование металлического вольфрама обусловлено тем, что его плотность, порядка 19000 кг/м³, близка

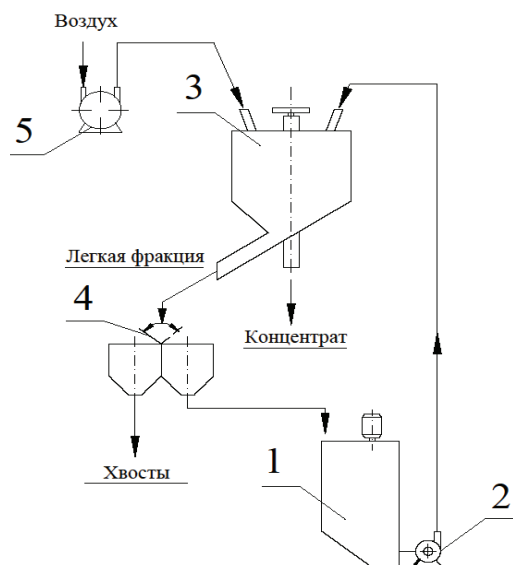


Рис. 6. Схема цепей аппаратов установки турбулизационной центробежной сепарации с пневматической турбулизацией пристеночного слоя

Fig. 6. Scheme of apparatus circuits of turbulizing centrifugal separation unit with pneumatic turbulization of near wall layer

к плотности золота. Данное сходство по плотностям позволяет использовать результаты экспериментов применительно к золоту.

Исследования выполнены на порциях искусственной смеси массой 2 кг с массовой долей вольфрама 1, 3, 5%. Центробежную сепарацию проводили при скорости вращения конуса 1100 мин^{-1} и давлении воздуха 0,5 МПа. Количество циркуляций легкой фракции в режиме циркуляционной сепарации составило 3, количество порций в накопительной технологии составило 5, 10, 15. Результаты центробежной сепарации приведены в таблице.

Заключение

Установлено, что использование пневматической турбулизации пристеночного слоя конуса в циркуляционно-накопительной технологии позволяет получить вольфрамовый концентрат с массовой долей вольфрама

Результаты центробежной сепарации при переработке заданного количества порций с гидравлической турбулизацией и пневматической турбулизацией

Centrifugal separation results for processing a given number of portions with hydraulic turbulization and pneumatic turbulization

Показатель	Количество порций исходного питания		
	5	10	15
С гидравлической турбулизацией пристеночного слоя			
Выход концентрата, %	5,21	3,00	2,53
Массовая доля вольфрама в концентрате, %	17,70	29,58	32,47
Извлечение вольфрама в концентрат, %	92,24	88,75	82,15
Расход турбулизирующей воды, л	133	266	399
С пневматической турбулизацией пристеночного слоя			
Выход концентрата, %	5,29	3,08	2,60
Массовая доля вольфрама в концентрате, %	18,50	31,71	36,29
Извлечение вольфрама в концентрат, %	97,75	97,69	94,36
Расход турбулизирующей воды, л	0	0	0

32–36%, при извлечении в него вольфрама 98–94%.

Для сравнения, при гидравлической турбулизации пристеночного слоя в одинаковых условиях достигнуто качество вольфрамового концентрата от 30 до 33%, при извлечении в него вольфрама 88–82%.

Таким образом, пневматическая турбулизация пристеночного слоя конуса центробежного сепаратора позволяет исключить использование воды для турбулизации и обеспечивает более высокие показатели циркуляционно-накопительной технологии.

Технология может быть рекомендована к широкому использованию для извлечения тонкодисперсных частиц благородных металлов и других материалов повышенной плотности.

Вклад авторов

Пеньков П. М. — проведение экспериментов, получение данных для анализа, написание текста статьи.

Морозов Ю. П. — генерация идеи исследования, анализ результатов исследования.

Хамидулин И. Х. — постановка задачи исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Givemore Sakuhuni, N. Emre Altun, Bern Klein. Modelling of continuous centrifugal gravity concentrators using a hybrid optimization approach based on gold metallurgical data // *Minerals Engineering*. 2022, vol. 179(12), 107425. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107425.

2. Marion C., Langlois R., Kökkılıç O., Zhou M., Williams H., Awais M., Rowson N. A., Waters K. E. A design of experiments investigation into the processing of fine low specific gravity minerals using a laboratory Knelson Concentrator // *Minerals Engineering*. 2019, vol. 135, pp. 139–155. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.023.

3. Телков Ш. А., Мотовилов И. Ю., Барменшинова М. Б., Медяник Н. Л., Даруеш Г. С. Обоснование возможности использования гравитационного обогащения свинцово-цинковой руды месторождения Шалкия // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2019. — № 3. — С. 99–105. — DOI: 10.15372/FTRPR120190312.

4. Алгебраистова Н. К., Самородский П. Н., Колотушкин Д. М., Прокопьев И. В. Технология извлечения золота из золотосодержащего техногенного сырья // *Обогащение руд*. — 2018. — № 1(373). — С. 33–37. DOI: 10.17580/or.2018.01.06.

5. Сенченко А. Е., Федотов К. В., Федотов П. К., Бурдонов А. Е. Технологическая оценка обогатимости руды гравитационными методами // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2020. — № 4. — С. 262–280.

6. Суримбаев Б. Н., Каналы Е. С., Болотова Л. С., Шалгимбаев С. Т. Оценка гравитационной обогатимости золотосодержащей руды — GRG // *Горные науки и технологии*. — 2020. — № 5(2). — С. 92–103. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-92-103.

7. Пеньков П. М., Морозов Ю. П., Прокопьев С. А. Влияние вязкостного сопротивления на конечные скорости стесненного движения частиц // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 11–1. — С. 119–126. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_119.

8. Токтар Г., Кауметова Д. С., Койжанова А. К. Исследования обогатимости золотосодержащей руды // *Отечественная геология*. — 2022. — № 6. — С. 86–94. DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10037.

9. Лучко М. С. Применение центробежной отсадочной машины для контрольного обогащения золотосодержащего сырья на ЗИФ // *Вестник Кузбасского госу-*

дарственного технического университета. — 2022. — № 4 (152). — С. 67–75. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-4-67-75.

10. Усов Г. А., Фролов С. Г., Тарасов Б. Н. Разработка технологии извлечения россыпного микронного золота с использованием диспергирования глинистой составляющей вмещающих пород // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2019. — № 5. — С. 75–82. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-75-82.

11. Пилов П. И., Кирнарский А. С. Технологическая однопараметричность как инструмент повышения селективности сепарационных процессов // Обогащение руд. — 2020. — № 2. — С. 21–28. DOI: 10.17580/or.2020.02.04.

12. 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.

13. Коновалов В. Е., Семячков А. И., Почечун В. А. Мероприятия по ликвидации негативного влияния техногенных вод горнопромышленной территории на окружающую среду // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Том II. — Пермь: ПГНИУ, 2019. — С. 125–129. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012053.

14. Макаров А. Б., Талалай А. Г., Гуман О. М., Хасанова Г. Г. Техногенные месторождения и особенности их воздействия на природную окружающую среду // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2022. — № 3. — С. 120–129. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-120-129.

15. Луканин А. В. Инженерная экология: защита литосферы от твердых промышленных и бытовых отходов: Учебное пособие. — М.: «ИНФРА-М», 2018. — 556 с. DOI: 10.12737/textbook_594ceae2a8e490.61608344.

16. Воробьев М. А., Кашинский О. Н., Лобанов П. Д., Чинак А. В. Формирование мелкодисперсной газовой фазы в восходящем и опускном потоке жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. — 2012. — № 4. — С. 75–81.

17. Исаев В. И. Аварийное фонтанирование газа через слой жидкости // Альманах мировой науки. — 2015. — № 3–1(3). — С. 81–82.

18. Патент РФ 2006132251/03, 08.09.2006. Куликов Ю. В., Манух Д. Г., Потемкин А. А., Сенченко А. Е., Федотов К. В. Способ центробежной сепарации. 2008. Бюл. № 10

19. Патент РФ 2002126068/03, 02.10.2002. Руднев Б. П., Тарасов А. В., Енбаев И. А., Шамин А. А., Клишин Д. А. Устройство для извлечения благородных металлов. 2003. Бюл. № 16.

20. Морозов Ю. П., Бекчурина Е. А., Пеньков П. М. Особенности пневматической турбулизации пристеночного слоя в центробежном сепараторе // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXVII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XX Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. — Екатеринбург: ИП Русских А. В., 2022. — С. 8–12.

21. Ксенофонтов Б. С. Повышение эффективности струйной аэрации в процессах флотационной очистки сточных вод // Сантехника. — 2020. — № 4. — С. 36–39.

22. Behzad Vaziri Hassas, Sabri Kouachi, Amir Eskinlou. The significance of positive and negative inertial forces in Particle-Bubble interaction and their role in the general flotation kinetics model // Minerals Engineering. 2021, vol. 170(1–4), 107006. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107006.

23. Varney Kromah, Powoe S. B., Khosravi R. Coarse particle separation by fluidized-bed flotation: A comprehensive review // Powder Technology. 2022, vol. 409(9), 117831. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117831.

24. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П. Взаимодействие минеральной частицы со свободным пузырьком воздуха в жидкости // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 6. — С. 125–135. DOI: 10.15372/FTPRPI20200611.

25. Николаев А. А., Батхуяг А., Горячев Б. Е. Исследование кинетики минерализации пузырька воздуха в суспензии шламовых фракций пирита в динамических условиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 5. — С. 154–158. DOI: 10.15372/FTPRPI20180515.

26. Тараканов А. Г., Куди А. Н., Пронин В. А., Долгунин В. Н. Влияние параметров потока на эффекты сепарации частиц при быстром сдвиговом течении // Инновационные научные исследования. — 2022. — № 10(22). — С. 14–24. DOI: 10.5281/zenodo.7236471.

27. Бухоров Ш. Б., Қодиров Х. И., Абдикамалова А. Б., Эшметов И. Д. Значения флотационного процесса, исследование флотационных реагентов и механизмов их действия на поверхности раздела фаз // *Universum: Химия и Биология*. — 2020. — № 9(75). — С. 45–50.

28. Кондратьев С. А., Коваленко К. А. Определение зависимости крупности флотиремых частиц от их свойств и гидродинамики флотационной камеры // *Интерэкспо Гео-Сибирь* — 2021. — Т. 2. — № 3. — С. 230–238. DOI: 10.33764/2618–981X-2021-2-3-230–238. **МИАБ**

REFERENCES

1. Givemore Sakuhuni, N. Emre Altun, Bern Klein. Modelling of continuous centrifugal gravity concentrators using a hybrid optimization approach based on gold metallurgical data. *Minerals Engineering*. 2022, vol. 179(12), 107425. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107425.

2. Marion C., Langlois R., Kökkılıç O., Zhou M., Williams H., Awais M., Rowson N. A., Waters K. E. A design of experiments investigation into the processing of fine low specific gravity minerals using a laboratory Knelson Concentrator. *Minerals Engineering*. 2019, vol. 135, pp. 139–155. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.023.

3. Telkov S. A., Motovilov I. Y., Barmenshinova M. B., Daruesh G. S., Medyanik N. L. Substantiation of gravity concentration to the shalkiya deposit lead-zinc ore. *Journal of Mining Science*. 2019, vol. 55, no. 3, pp. 430–436. [In Russ].

4. Algebraistova N. K., Samorodskiy P. N., Kolotushkin D. M., Prokopyev I. V. Technology of gold recovery from gold-bearing technogenic raw materials. *Obogashchenie Rud*. 2018, no. 1(373), pp. 33–37. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2018.01.06.

5. Senchenko A. E., Fedotov K. V., Fedotov P. K., Burdonov A. E. Technological evaluation of ore processibility gravitational methods. *Izvestiya Tula State University. Science of Earth*. 2020, no. 4, pp. 262–280. [In Russ].

6. Surimbaev B. N., Kanaly E. S., Bolotova L. S., Shalgymbaev S. T. Assessment of Gravity Dressability of Gold Ore – GRG Test. *Mining Science and Technology*. 2020, vol. 5(2), pp. 92–103. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-92–103.

7. Penkov P. M., Morozov Y. P., Prokopyev S. A. Influence of viscosity resistance on the final velocities of stressed motion of particles. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2022, no. 11–1, pp. 119–126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_119.

8. Toktar G., Kaumetova D. S., Koizhanova A. K. Study of gold-bearing ore bonification ability. *National Geology*. 2022, no. 6, pp. 86–94. [In Russ]. DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10037.

9. Luchko M. S. Application of a centrifugal jigging machine for upgrading of gold-bearing materials at gold-processing plants. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022, no. 4 (152), pp. 67–75. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-4-67–75.

10. Usov G. A., Frolov S. G., Tarasov B. N. Developing the technology of extracting placer micron sized gold with the use of enclosing rock clay bond dispersion. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019, no. 5, pp. 75–82. [In Russ]. DOI 10.21440/0536-1028-2019-5-75–82.
11. Pilov P. I., Kirnarsky A. S. Industrial use of single parameters as a tool to improve separation selectivity. *Obogashchenie Rud*. 2020, no. 2, pp. 21–28. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2020.02.04.
12. Morozov Yu. P., Penkov P. M., Dmitriev V. T. Investigating the method of improving technological parameters of centrifugal separation with pneumatic turbulization. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020, no. 4, pp. 62–69. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-62–69.
13. Konovalov V. E., Semyachkov A. I., Pochechun V. A. Actions for liquidation of negative influence of technogenic waters of the mining territory on environment. *Modern problems of reservoirs and their watersheds: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. Vol. II*. Perm: Perm State National Research University. 2019, pp. 125–129. [In Russ]. DOI: 10.1088/1755–1315/321/1/012053.
14. Makarov A. B., Talalay A. G., Guman O. M., Khasanova G. G. Anthropogenic deposits and their impact on the natural environment. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2022, no. 3, pp. 120–129. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-120–129.
15. Lukanin A. V. Engineering Ecology: Protection of Lithosphere from Solid Industrial and Domestic Waste: Textbook Moscow, INFRA-M Publishing House. 2018, 556 p. [In Russ]. DOI: 10.12737/textbook_594ceae2a8e490.61608344.
16. Vorobyev M. A. Formation of the finely dispersed gas phase in upward and downward fluid flows. *Fluid Dynamics*. 2012, no. 4, pp. 75–81. [In Russ].
17. Isaev V. I. Emergency gas gushing through the liquid layer. *World science almanac*. 2015, no. 3–1(3), pp. 81–82. [In Russ].
18. Patent of the Russian Federation 2006132251/03, 08.09.2006. Kulikov Yu. V., Manukh D. G., Potemkin A. A., Senchenko A. E., Fedotov K. V. Method of centrifugal separation. 2008. Bulletin № 10. [In Russ].
19. Patent RF 2002126068/03, 02.10.2002 Rudnev B. P., Tarasov A. V., Enbaev I. A., Shamin A. A., Klishin D. A. Device for the extraction of noble metals. 2003. Bulletin № 16. [In Russ].
20. Morozov Y. P., Bekchurina E. A., Penkov P. M. Peculiarities of pneumatic turbulization of the near-wall layer in a centrifugal separator. *Scientific bases and practice of ore and technogenic raw materials processing: Proceedings of the XXVII International Scientific and Technical Conference held within the framework of the XX Ural Mining Decade, Ekaterinburg, April 07–08, 2022*. Ekaterinburg, IP Russkikh A. V., 2022, pp. 8–12. [In Russ].
21. Ksenofontov B. S. Increased Efficiency of Jet Aeration in Flotation Treatment of Waste Water. *Santehnika journal*. 2020, no. 4, pp. 36–39. [In Russ].
22. Behzad Vaziri Hassas, Sabri Kouachi, Amir Eskanlou, The significance of positive and negative inertial forces in Particle-Bubble interaction and their role in the general flotation kinetics model. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 170(1–4), 107006. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107006.
23. Varney Kromah, Powoe S. B., Khosravi R. Coarse particle separation by fluidized-bed flotation: A comprehensive review. *Powder Technology*. 2022, vol. 409(9), 117831. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117831.
24. Kondratyev S. A., Moshkin N. P. Particle-free air bubble interaction in liquid. *Journal of Mining Science*. 2020, vol 56, no. 6, pp. 990–999. [In Russ]. DOI 10.15372/FTPRPI20200611.

25. Nikolaev A. A., Batkhuyag A., Goryachev B. E. Mineralization kinetics of air bubble in pyrite slurry under dynamic conditions. *Journal of Mining Science*. 2018, vol. 54, no. 5, pp. 840–844. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20180515.

26. Tarakanov A. G., Kudi A. N., Pronin V. A., Dolgunin V. N. Influence of flow parameters on the effects of particles separation in fast shear flow. *Innovative Scientific Research*. 2022, no. 10(22), pp. 14–24. [In Russ]. DOI: 10.5281/zenodo.7236471.

27. Bukhorov Sh. B., Kodirov H. I., Abdikamalova A. B., Eshmetov I. D. Importance of the flotation process, study of flotation reagents and mechanisms of their action on the surface of the phase section. *Universum: Chemicals and Biology*. 2020, no. 9(75), pp. 45–50. [In Russ].

28. Kondratyev S. A., Kovalenko K. A Determination of the dependence of the size of the floated particles on their properties and the hydrodynamics of the flotation chamber. *Interexpo Geo-Siberia*. 2021, vol. 2, no. 3, pp. 230–238. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618–981X-2021-2-3-230–238.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пеньков Павел Михайлович — инженер-исследователь, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30; e-mail: Pavel.Penkov@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9531-1896;

Морозов Юрий Петрович — доктор тех. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: tails2002@inbox.ru., ORCID ID: 0000-0003-0554-5176;

Хамидулин Иршат Халилович — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»; Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. gmf.opi@ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0002-9018-2922.

Для контактов: Пеньков Павел Михайлович, e-mail: Pavel.Penkov@m.ursmu.ru.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Penkov P. M., research engineer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144, e-mail: Pavel.Penkov@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9531-1896;

Morozov Yu. P., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144, ORCID ID: 0000-0003-0554-5176, e-mail: tails2002@inbox.ru;

Khamidulin I. K., Associate Professor, PhD, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144, ORCID ID: 0000-0002-9018-2922.

For contacts: *Penkov P. M.*, e-mail: Pavel.Penkov@m.ursmu.ru.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 09.11.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 09.11.2023; accepted for printing 10.11.2023.

