

Обогащение полезных ископаемых

УДК 622.755

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-527-538>

Механизм дополнительной сегрегации минералов по плотности в постели центробежно-вибрационного концентратора

О. Ю. Очосов[✉], А. И. Матвеев

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]ochos@mail.ru*

Аннотация

Испытан центробежно-вибрационный концентратор конструкции Института горного дела Севера СО РАН, разработанный на основе ранее проведенных исследований. Отличие данного концентратора от существующих аналогов заключается в том, что его рабочий орган совершает вибрационные колебания, направленные вдоль оси своего вращения. Результаты испытаний показали высокую степень влияния частоты вибрационных колебаний на извлечение тяжелых минералов, что явилось основой разработки новой конструкции центробежного концентратора. Новая конструкция имеет возможность управления параметрами вибрационных колебаний, что позволяет активно использовать новый эффективный механизм сегрегации (улавливания) тяжелых компонентов. Достигнут наилучший уровень извлечения тяжелых минералов до 63,9 % при частоте колебательных воздействий 22 Гц и амплитуде 2 мм при разделении искусственной смеси, состоящей из речного песка и магнетита крупностью 0,5 мм. Определено, что накопленная постель тяжелых минералов в рабочем органе центробежно-вибрационного концентратора переходит в активное разрыхленное состояние при амплитуде колебаний более 1,5 мм. В случае переработки естественных минеральных комплексов возможны экспериментальный подбор и обоснование наиболее рациональных режимных условий разделения.

Ключевые слова: центробежный концентратор, обогащение, извлечение, вибрационные колебания, центробежная сила, постель, тяжелые минералы, золото, концентрат, хвосты

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетной программы НИР №FWRS-2021-0022. Лабораторные исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Очосов О. Ю., Матвеев А. И. Механизм дополнительной сегрегации минералов по плотности в постели центробежно-вибрационного концентратора. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):527–538. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-527-538>

The mechanism of additional segregation of minerals by density in the bed of the centrifugal-vibrating concentrator

O. Yu. Ochoso[✉], A. I. Matveev

*Chersky Institute of Mining of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[✉]ochos@mail.ru*

Abstract

In this study we tested a centrifugal vibration concentrator developed by the Institute of Mining of the North SB RAS. Unlike existing analogues, the working body of the concentrator performs vibrations directed along its rotation axis. The test results showed a high degree of influence of the vibration frequency on the extraction of heavy minerals. The new centrifugal concentrator has the ability to control the parameters of vibrations, enabling an active use of the new effective mechanism for segregation (trapping) of heavy components. The best level of extraction of heavy minerals

(63.9 %) was achieved with an oscillation frequency of 22 Hz and an amplitude of 2 mm when separating an artificial mixture consisting of river sand and magnetite with a grain size of -0.5 mm. The accumulative bed of heavy minerals in the working organ of the centrifugal vibration concentrator passes into an active loosened state with an oscillation amplitude of more than 1.5 mm. Experimental selection and justification of the most rational regime conditions is applicable in the case of processing natural mineral complexes.

Keywords: centrifugal concentrator, enrichment, extraction, vibration vibrations, centrifugal force, bed, heavy minerals, gold, concentrate, tailings

Funding. This study was carried out within the framework of the budget programme (number FWRS-2021-0022). We used the equipment of the Shared core facilities (SCF) of the Federal Research Centre SB RAS for the laboratory research (grant number 13.SCF.21.0016).

For citation: Ochosov O.Yu., Matveev A.I. The mechanism of additional segregation of minerals by density in the bed of the centrifugal-vibrating concentrator. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):527–538. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-527-538>

Введение

Для многих регионов России горнодобывающая промышленность была, есть и останется в перспективе основой социально-экономического развития. К этим регионам относятся и Якутия и Северо-Восток России. К числу ключевых проблем развития горнодобывающей промышленности относится модернизация существующих технологий переработки и обогащения золота, в том числе создание новых рациональных геотехнологий, отвечающих современным требованиям эффективности производства. Основная задача эффективного недропользования на современном этапе в части обогащения и переработки золотосодержащего сырья формулируется как повышение уровня полноты и комплексности извлечения полезных компонентов при добыче и переработке, а также глубокой переработке продуктов извлечения на основе детального изучения технологических свойств труднообогатимого золота.

На фоне постепенного сокращения запасов золотосодержащих месторождений в переработку начинает вовлекаться минеральное сырье с более низким содержанием золота или с преобладающим содержанием труднообогатимого золота, но при этом традиционные технологии обогащения золота, в особенности на базе промприборов и небольших обогатительных установок, остаются ориентированными на переработку и обогащение легкообогатимого минерального сырья. В связи с этим технологические потери при использовании традиционных технологий добычи могут достигать 25–54 % [1, 2].

Основными параметрами, характеризующими труднообогатимость золота, являются его фракционный состав, крупность и форма частиц, чем мельче золото, тем сложнее оно поддается обога-

щению, поэтому решение проблем обогащения мелкого и тонкого золота остается актуальной задачей [3–5]. В целом, решение проблем обогащения мелкого и тонкого золота повышает эффективность рационального использования этого ценного природного ресурса.

Существующая технология

Развитие технологий обогащения минерального сырья позволяет вовлекать в переработку месторождения с более низким содержанием полезных компонентов со сложным фракционным составом. В области гравитационного обогащения тяжелых минералов это стало возможным благодаря появлению современных центробежных концентраторов безнапорного типа, которые в первую очередь применяются в золотодобывающей промышленности [6–10].

Принципиально конструкция центробежных концентраторов остается однотипной, но они различаются формой улавливающей поверхности рабочего органа и способом разрыхления минеральной постели. Принципиальная конструкция центробежных концентраторов представлена на рис. 1.

Подобные аппараты, в основном, состоят из рабочего органа (ротора) в виде чаши или конуса, который соединен с приводным валом и системой подшипников, установленных на раме, также в аппаратах имеются устройства для загрузки и разгрузки продуктов обогащения [11]. Центробежная сила в этих концентраторах создается принудительным вращением исходного материала в виде пульпы при подаче питания на дно рабочего органа. Под действием центробежной силы тяжелые частицы оседают внутри улавливающих рифлей рабочего органа, формируя постель из тяжелых минералов, а легкие

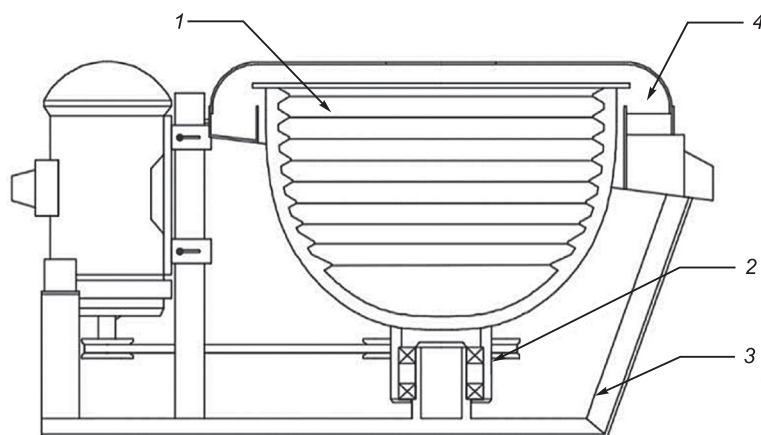


Рис. 1. Безнапорный центробежный концентратор. 1 – рабочий орган в виде чаши; 2 – приводной вал с системой подшипников; 3 – несущая рама; 4 – устройство загрузки и разгрузки продуктов обогащения.

Fig. 1. Non-pressure centrifugal concentrator. 1 – a working body in the form of a bowl; 2 – a drive shaft with a bearing system; 3 – a supporting frame; 4 – a device for loading and unloading enrichment products.

уносятся смывным потоком пульпы за пределы рабочего органа.

На данный момент существует множество разновидностей безнапорных центробежных концентраторов. По способу разрыхления постели они делятся на группы: без разрыхления постели (центрифуги); с механическим разрыхлением постели (типа Orocon); с вибрационным разрыхлением постели (типа ЦВК, СЦВ); с флюидизационным разрыхлением постели (с помощью оживающей воды) (концентраторы Knelson, Falcon, СЦМ, Итомак).

Один из распространенных центробежных аппаратов – концентратор Кнелсона, представляющий собой высокоскоростную центрифугу, в которой создается центробежное поле с ускорением до 60g, снабженную устройством для подачи оживающей (промывной) воды. Данный аппарат в последнее время является эталоном по извлечению мелкого и тонкого золота, т. е. эффективность всех вновь разрабатываемых и создаваемых аппаратов центробежной сепарации сравнивается с результатами обогащения. Существует соответствующий международный тест испытания GRG [12, 13].

У концентратора ЦВК ОАО «Грант» разрыхление постели в нарифлениях конической вращающейся чаши производится путем наложения планетарных колебаний высокой частоты (до 150:1/с). У концентратора ЦКПП АО «Полиметалл» разрыхление постели в нарифлениях производится путем деформации конической

чаши из полиуретана тремя роликами в процессе ее вращения, так что верхний срез чаши принимает вид треугольника со сглаженными углами. Этим достигаются разные значения центробежной силы на разделяемые частицы в разных точках внутренней поверхности чаши и достигаются условия для поддержания разрыхленного состояния постели.

Несколько оригинально и просто вопрос обеспечения оптимальной разрыхленности и сегрегационного разделения в условиях подачи оживающей воды решается в концентраторе «ИТОМАК», в котором расположение оси вращения рабочего конуса находится в горизонтальной (или наклонной) плоскости [14]. Такое расположение оси вращения приводит к самопроизвольным колебаниям минерального слоя, в результате чего интенсивность процесса распределения частиц по плотности возрастает. Горизонтальное (или наклонное) положение ротора позволяет ускорить разгрузку, повысить надежность работы и улучшить условия эксплуатации основных узлов концентратора.

Сравнительными исследованиями А.В. Богдановича [15] на искусственных смесях различного размера и производительности, с различными принципами разрыхления осевшего продукта – «Knelson-3», «Falcon SB-40», «ЦВК-100» конструкции ОАО «Грант» и ЦКПП-120 конструкции АО «Полиметалл», показано преимущество концентраторов (ЦВК и ЦКПП) сегрегацион-

ного типа, лучше извлекающих тонкие частицы с высокой плотностью, чем аппараты, в которых разрыхление постели ведется взвешивающим потоком воды.

Применение безнапорных центробежных концентраторов позволяет доизвлекать мелкое и тонкое золото, теряющееся с хвостами традиционного шлюзового обогащения, что в ряде случаев экономически выгодно, причем не только собственно из золотоносных, но и таких, в которых основными полезными компонентами являются другие полезные компоненты, такие как медь, никель, железо, цинк и т. д. Но, вместе с тем, опыт эксплуатации безнапорных центробежных концентраторов показывает существенные различия в эффективности их использования, связанные с высокой динамикой процесса, сложностью их регулирования по мере накопления тяжелых минералов в формирующейся постели в рабочей зоне сепараторов. Это часто приводит к «насыщению» и снижению фактической «емкости» по улавливанию полезного компонента. Помимо этого, сложность процесса центробежной концентрации обуславливает особые требо-

вания к условиям эксплуатации, квалификации и опыту работы обслуживающего персонала.

Для наиболее широко распространенных центробежных концентраторов, работающих с использованием флюадизационного способа разрыхления минеральной постели, одним из важных условий эксплуатации, обеспечивающих эффективность его работы, является подача чистой воды [16], что в большинстве случаев при разработке россыпных месторождений представляет дополнительные затраты. В случае использования оборотной воды эффективность извлечения золота обеспечивают центробежные концентраторы, работающие по вибрационному способу разрыхления минеральной постели за счет снятия излишней вязкости воды и нейтрализации влияния тонкодисперсных взвешенных шламов [17].

Материалы исследований

В лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН по результатам ранее проведенных исследований по изучению влияния вибрационных колебаний на минеральную постель [18, 19] было установлено, что максимально быстрое расслоение постели по плотности происходит при вибрационных колебаниях, направленных перпендикулярно направлению осаждающей силы, т. е. силы тяжести. Основываясь на этом эффекте расслоения минеральных частиц под действием направленных вибрационных колебаний, был разработан и изготовлен новый центробежно-вибрационный концентратор, главной особенностью которого, в отличие от существующих аналогов, является то, что рабочий орган совершает вибрационные колебания, направленные вдоль оси своего вращения [20]. А также по результатам исследований сформирована новая заявка на изобретение в части усовершенствования более раннего патента.

Концентратор (рис. 2) состоит из ротора 1 в виде усеченного конуса или чаши, со сменной улавливающей поверхностью с внутренней стороны 2, соосно установленного на верхней стороне центрального вала 3, который соосно помещен в приводной вал 4, вращающийся на подшипниках 5, укрепленных в несущем корпусе 6. Приводной вал вращается с помощью клиноременной передачи 7 и двигателя 8. В нижней части центрального вала помещен вибратор в виде соосно укрепленного сердечника 9, вокруг которого расположены электрические катушки 10,

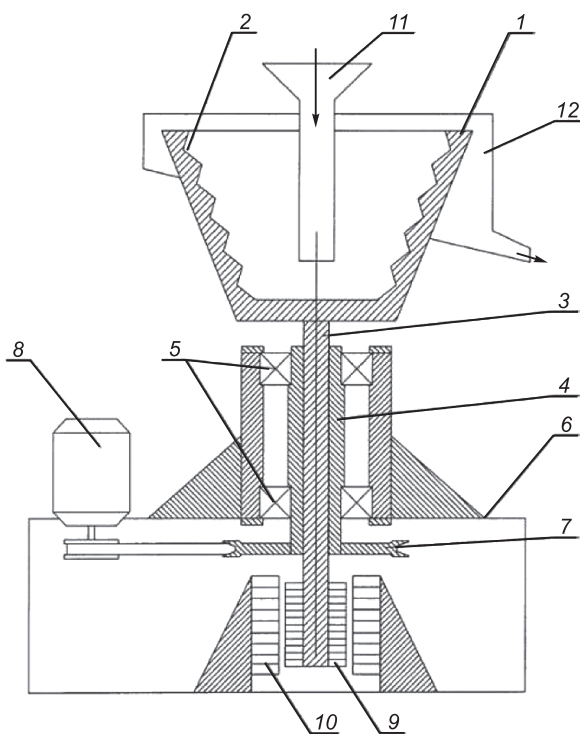


Рис. 2. Конструкция центробежно-вибрационного концентратора. Пояснения см. в тексте.

Fig. 2. Design of a centrifugal vibration concentrator. Explanations see in the text.

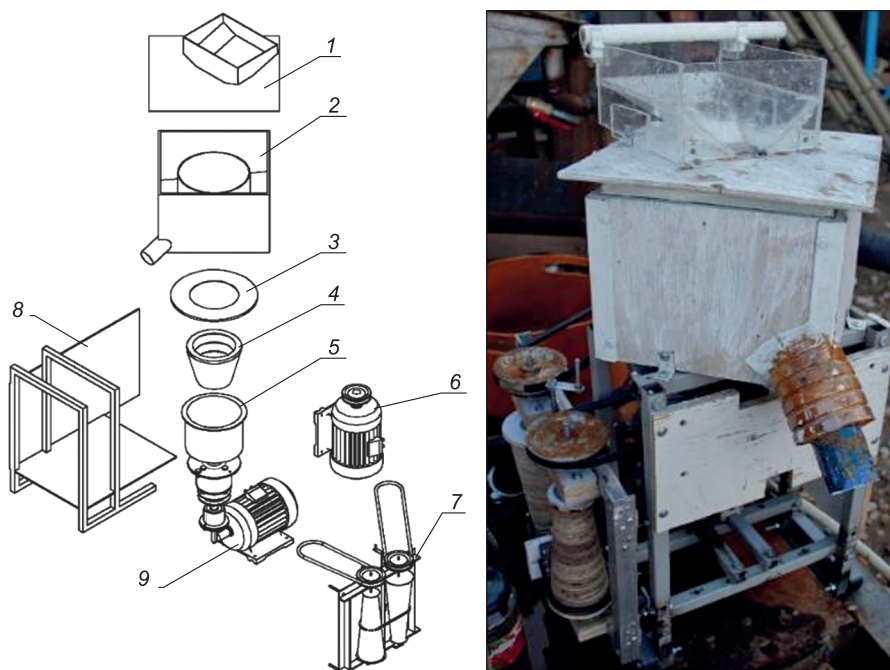


Рис. 3. Общий вид лабораторной модели центробежно-вибрационного концентратора. 1 – крышка с приемным бункером, 2 – кожух, 3 – зажимное кольцо, 4 – съемная футеровка, 5 – узел рабочего органа, 6 – приводной двигатель, 7 – валковый вариатор, 8 – несущая рама, 9 – двигатель вибратора.

Fig. 3. General view of a laboratory model of a centrifugal vibration concentrator. 1 – cover with a receiving hopper, 2 – casing, 3 – clamping ring, 4 – removable lining, 5 – working body assembly, 6 – drive motor, 7 – roller variator, 8 – supporting frame, 9 – vibrator motor.

установленные в несущем корпусе. Центральный вал вместе с ротором и сердечником вращается с равной скоростью с приводным валом, посредством шпоночного или шлицевого соединения с возможностью совершения колебательного движения, генерируемого вибратором, вдоль оси своего вращения. Также концентратор оснащен патрубком исходного питания 11, помещенным внутри ротора, и устройством для разгрузки продуктов разделения 12.

Концентратор работает следующим образом. Исходное питание в виде пульпы подается через патрубок исходного питания 11 на дно ротора 1, вращающегося посредством двигателя 8, клиноременной передачи 7, приводного вала 4 с подшипниками 5 в корпусе 6 и центрального вала 3. При этом под действием центробежной силы более плотные частицы задерживаются в улавливающей поверхности 2, а менее плотные разгружаются через разгрузочное устройство 12. Для предотвращения уплотнения попавших в улавливающую поверхность 2 более плотных частиц ротор 1 совершает колебательные движения по оси своего вращения, генерируемый вибратором

в виде сердечника 9, вокруг которого расположены электрические катушки 10, посредством центрального вала 3.

Общий вид изготовленной лабораторной модели центробежно-вибрационного концентратора представлен на рис. 3. Несущая рама концентратора выполнена из профилированной трубы с размерами 15×15×1,2, соединенных болтовыми креплениями. Рабочий орган изготовлен в виде чаши со съемной футеровкой из оргстекла.

Рабочий орган устанавливается на приводной вал, помещенный в корпус шарикорадиальных подшипников. Передача вибрационных колебаний на рабочий орган осуществляется через систему роликовых подшипников, установленных на нижней части приводного вала. Вращение рабочего органа осуществляется асинхронными электродвигателями мощностью 0,55 кВт и 0,3 кВт частотой вращения 1250 об./мин. Режим работы концентратора является периодическим, т. е. по мере соответствующего накопления тяжелых полезных компонентов в постели полученный концентрат разгружают в накопитель концентрата.

Таблица 1

Сводная таблица результатов экспериментов

Table 1

Summary table of experimental results

Параметр	Номер эксперимента								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота колебания ротора, Гц	40	40	40	22	22	22	0	0	0
Частота оборотов ротора, об./мин	460	375	260	460	375	260	460	375	260
Технологические параметры									
Извлечение, %	39,40	54,20	63,10	34,70	59,20	64,30	32,00	41,00	27,90
Содержание магнетита в концентрате, %	4,52	6,83	7,79	4,27	7,00	7,96	3,59	4,79	3,18
Выход, г	87,20	79,40	81,00	81,30	84,60	80,80	89,20	85,60	87,60

Эксперименты на концентраторе проводились при частоте вращения рабочего органа 460, 375 и 260 об./мин, при частоте вибрационных колебаний 40, 22 Гц и без разрыхления, т. е. при частоте 0 Гц. При проведении экспериментов использовалась 5000 г искусственной смеси, состоящей из речного песка (–0,5 мм) и магнетита (–0,315 мм).

Для оценки и сравнения результатов экспериментов в табл. 1 и на рис. 4 приведены основные сводные качественно-количественные показатели обогащения в зависимости от параметров работы концентратора. Из таблицы и рисунка видно, что при одинаковой частоте колебаний ротора 40 Гц с уменьшением частоты оборотов ротора с 460 до 260 об./мин извлечение увеличивается с 39,4 до 63,1 %. Это связано с тем, что разрыхленность минеральной постели при снижении скорости оборотов ротора усиливается вследствие ослабления уплотняющей центробежной

силы, такая же динамика наблюдается при частоте колебаний 22 Гц. При работе ротора без вибрационных колебаний (0 Гц) извлечение магнетита остается на низком уровне 30–40 % из-за чрезмерного уплотнения минеральной постели. При одинаковой скорости оборотов ротора 260 об./мин с увеличением частоты вибрационных колебаний с 22 до 40 Гц наблюдается незначительное снижение извлечения с 64,3 до 63,1 %, а при скорости оборотов ротора 375 об./мин – с 59,2 до 54,2 %, возможно, это связано с тем, что увеличивается вероятность выноса минеральной постели из улавливающих рифлей при чрезмерной величине вибрационных колебаний. Наилучшие результаты по извлечению тяжелых минералов получены при частоте оборотов рабочего органа 260 об./мин и частоте колебаний 22 Гц – 64,3 %, при этой же частоте оборотов, но без разрыхления постели извлечение составило 27,9 %.

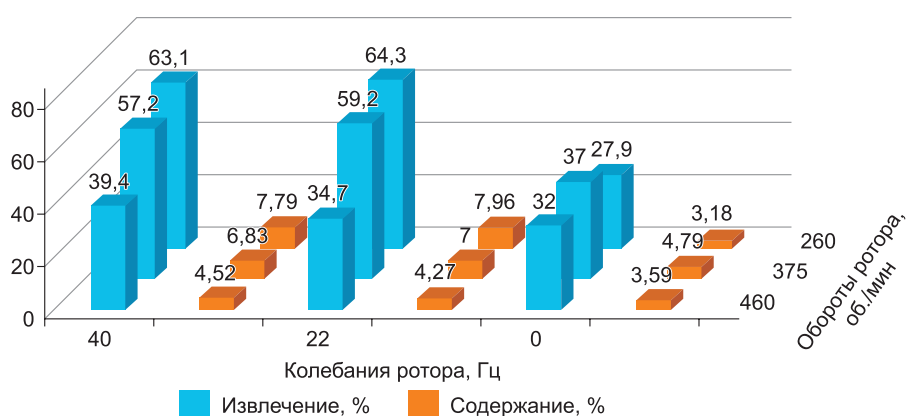


Рис. 4. Результаты экспериментов на центробежно-вибрационном концентраторе.

Fig. 4. Results of experiments on a centrifugal vibration concentrator.

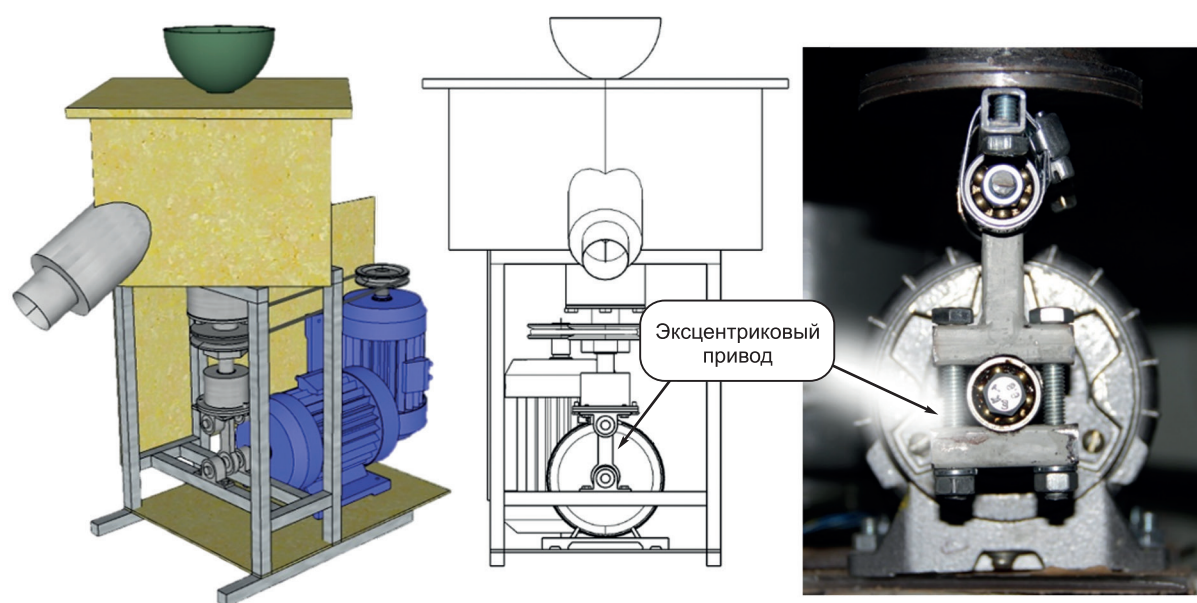


Рис. 5. Модернизированный центробежно-вибрационный концентратор.

Fig. 5. Upgraded centrifugal vibration concentrator.

Полученные результаты показывают степень влияния частоты вибрационных колебаний на извлечение тяжелых минералов, однако эксперименты проводились при фиксированном значении амплитуды колебаний рабочего органа 2,5 мм ввиду конструктивных ограничений центробежного концентратора.

В связи с этим для дальнейшего проведения исследований по уточнению рациональных параметров вибрационных колебаний и механизма их воздействия на процесс сегрегации (улавливания) тяжелых компонентов, проведена модернизация конструкции центробежного концентратора, а именно, доработана система привода вибратора для обеспечения возможности регулирования амплитуды колебаний (рис. 5). Техническая характеристика модернизированного концентратора приведена в табл. 2.

Было изготовлено пять вариантов эксцентриковых валов с амплитудой 0,5, 1, 1,5, 2 и 2,5 мм (рис. 6), благодаря которым возможно регулирование амплитуды колебаний с шагом 0,5 мм.

Система регулирования оборотов рабочего органа в виде валкового вариатора заменена на систему регулирования оборотов двигателя при помощи частотного преобразователя VACON0020-3L, что существенно упростило конструкцию концентратора и позволило расширить диапазон параметров колебательного воздействия.

Эксперименты на концентраторе проводились при заданной частоте вращения рабочего органа 260 об./мин, в диапазоне частоты колебаний от 0 до 60 Гц и амплитуде колебаний от 0,5 до 2,5 мм. Диапазоны регулирования параметров колебаний выбраны на основе конструктивных ограничений изготовленного концентратора, так как при частоте колебаний до 60 Гц выдерживается необходимая амплитуда колебаний.

При проведении экспериментов использовалась 2000 г искусственной модельной смеси, состоящей из речного песка (–1 мм) и магнетита (–0,5 мм). Результаты экспериментов приведены в табл. 3 и на рис. 7.

Таблица 2
Техническая характеристика
центробежно-вибрационного концентратора

Table 2
Technical characteristics
of the centrifugal vibration concentrator

Диаметр рабочего органа	134 мм
Масса	35 кг
Производительность	60 кг/ч
Габариты ДхШхВ	650×396×592 мм
Объем концентрата	До 100 г
Потребляемая мощность	1,5 кВт

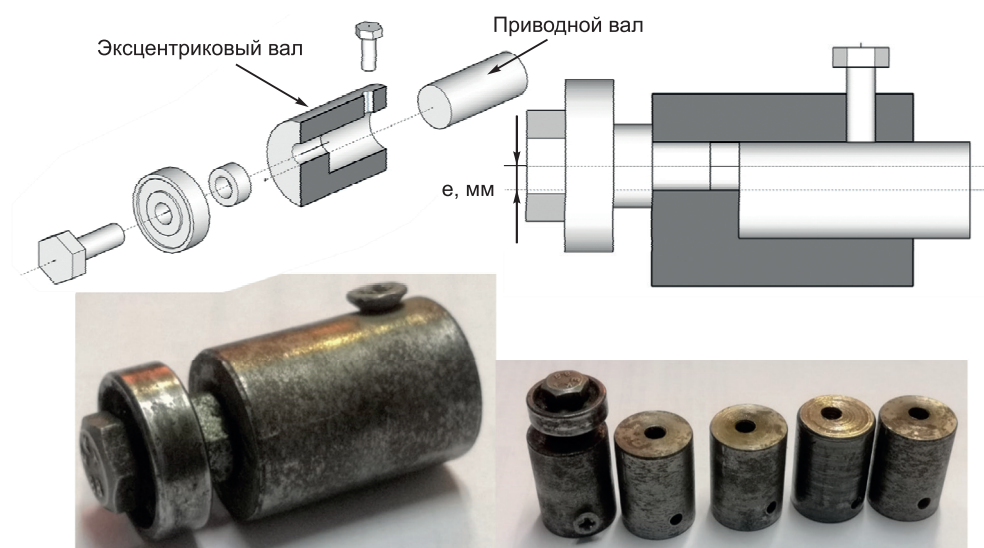


Рис. 6. Эксцентриковые валы привода вибратора центробежно-вибрационного концентратора.

Fig. 6. Eccentric shafts of the vibrator drive of the centrifugal vibration concentrator.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что при всех равных условиях экспериментов максимальное извлечение достигается на уровне колебаний 22 Гц при амплитуде колебаний более 1,5 мм. Достигнут максимальный уровень извлечения 61,2 % при амплитуде 2 мм. При меньших значениях амплитуды 1,5 мм постель концентратора сохраняет высокую степень уплотнения и уровень извлечения существенно падает до 35,2 %. В диапазоне от 0 до 22 Гц постель сохраняет высокую степень уплотнения, с чем связан низкий уровень извлечения, по сравнению с диапазоном частоты от 22 до 40 Гц, где достигается максимальное значение извлечения 63,9 %. При частоте колебаний более 40 Гц извлечение снижается до уровня 26,9 %, что

свидетельствует о массовом выносе материала постели из области рифленой поверхности рабочего органа.

В существующих вибрационных центробежных концентраторах векторы вибрационных колебаний находятся преимущественно в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения, т. е. в плоскости действия векторов центробежной силы, при котором траектории движения частиц взаимно пересекаются, что снижает эффект улавливания тяжелых частиц в постели (рис. 8).

В отличие от существующих вибрационных центробежных концентраторов, направленное воздействие вибрационных колебаний по оси вращения рабочего органа дает возможность снижения неуправляемого столкновения частиц

Т а б л и ц а 3

Сводная таблица результатов экспериментов

Table 3

Summary table of experimental results

Частота колебания ротора, Гц	Амплитуда колебаний ротора, мм									
	0,5		1,0		1,5		2,0		2,5	
	Извл. ϵ , %	Сод. β , %	Извл. ϵ , %	Сод. β , %	Извл. ϵ , %	Сод. β , %	Извл. ϵ , %	Сод. β , %	Извл. ϵ , %	Сод. β , %
0	28,20	4,25	31,20	4,26	36,10	5,10	33,70	4,85	37,20	4,61
22	35,20	4,78	36,50	4,88	40,30	6,23	63,90	8,34	62,40	10,05
40	38,10	5,93	37,10	5,15	42,10	6,06	58,70	9,06	61,20	8,49
60	32,10	4,78	37,10	5,60	36,90	5,31	26,90	5,23	27,80	4,56

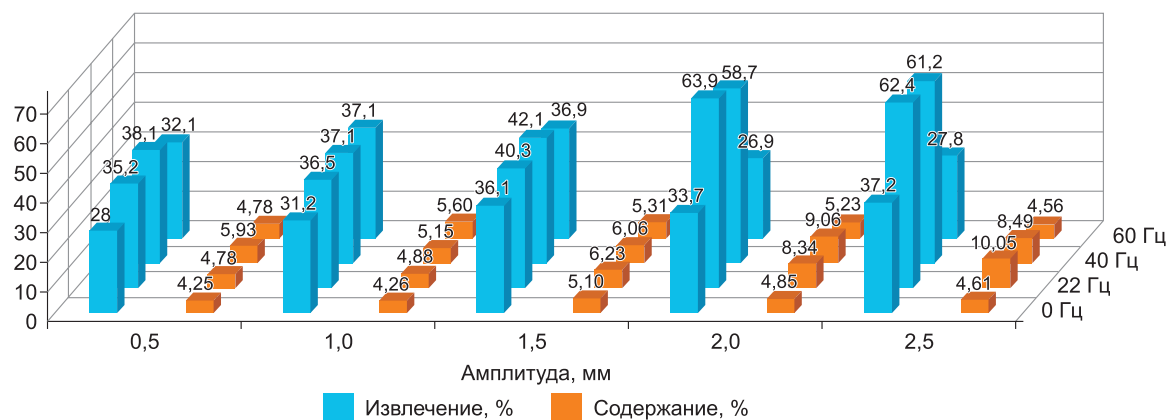


Рис. 7. Результаты экспериментов на модернизированном концентраторе.

Fig. 7. Results of experiments on the upgraded hub.

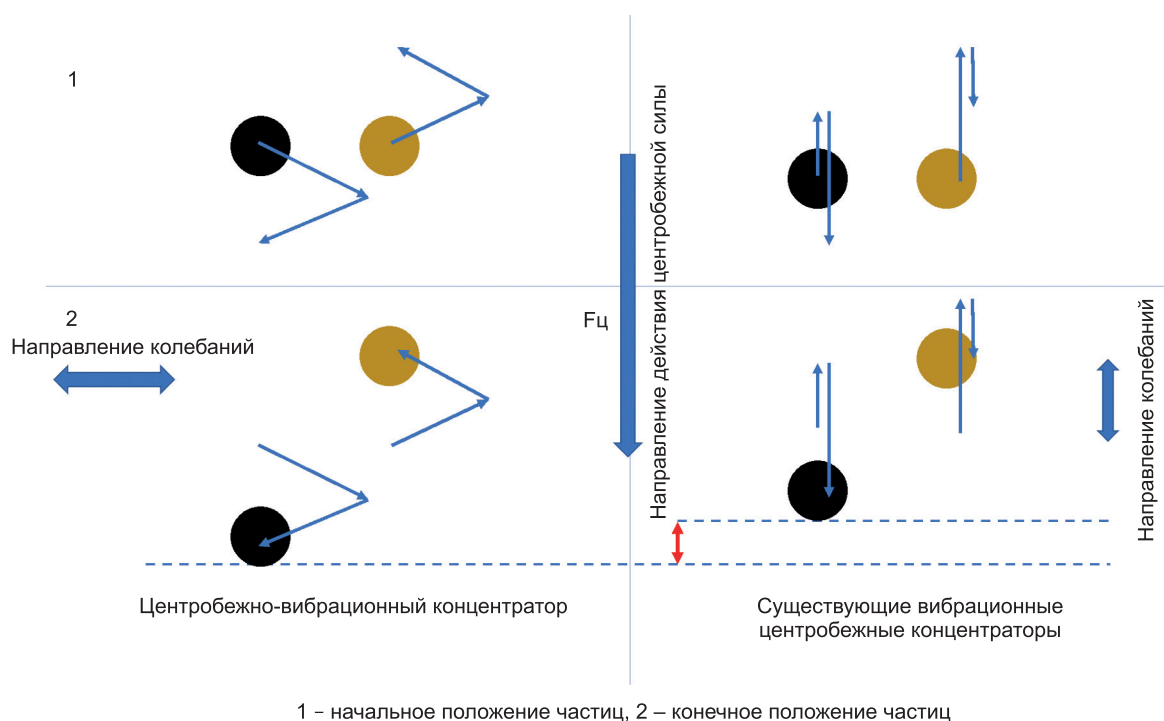


Рис. 8. Траектория перемещения тяжелых (черный) и легких (коричневый) частиц в поле действия центробежных сил при наложении вибрационных колебаний.

Fig. 8. The trajectory of movement of heavy (black) and light (brown) particles in the field of action of centrifugal forces during the imposition of vibration vibrations.

друг с другом за счет постоянного разрыхления постели в вертикальном срезе. При этом происходит постоянное раскрытие промежуточных зазоров между частицами, где и отмечается преимущественное западание тяжелых частиц, а заданная частота колебаний способствует избирательному выдавливанию легких частиц из постели по создаваемой суммарной разнице сил.

Закключение

Экспериментально показан эффект применения направленных колебаний на процесс разделения минералов в постели центробежных аппаратов разделения, что означает создание нового дополнительного рационального механизма сегрегации минералов по плотности в постели центробежного аппарата концентрации в поле дейст-

вия направленных колебательных воздействий. Определено, что постель тяжелых минералов в рабочем органе центробежно-вибрационного концентратора переходит в разрыхленное состояние при амплитуде колебаний более 1,5 мм. При этом достигнут наилучший уровень извлечения тяжелых минералов 63,9 % при частоте колебательных воздействий 22 Гц и амплитуде 2 мм при разделении искусственной смеси, состоящей из речного песка и магнетита крупностью –0,5 мм. Новый аппарат центробежной концентрации требует изготовления опытно-промышленных моделей для последующей реализации в технологических операциях в золотодобывающих предприятиях. Перспектива внедрения концентратора связана с доводочными операциями по повышению качества получаемых концентратов и снижению потерь. В случае естественных минеральных комплексов в условиях промышленных золотодобывающих предприятий возможны экспериментальный подбор и обоснование наиболее рациональных режимных условий разделения.

Список литературы / References

1. Липич А.В., Барышников В.И. Пути снижения технологических потерь при промывке золотоносных песков. *Безопасность труда в промышленности*. 2001;(7):14–16.
[Lipich A.V., Baryshnikov V.I. Ways to reduce technological losses during the washing of gold-bearing sands. *Occupational Safety in Industry*. 2001;(7):14–16. (In Russ.)]
2. Попова Ю.Т. Выбор типа промывочной установки на основе анализа существующих моделей для условий разработки россыпей Забайкалья. *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов*. 2017; 182–186.
[Popova Yu. T. Selection of the type of washing plant based on the analysis of existing models for the conditions of development of placers in Transbaikalia. *Kulagin readings: technique and technology of production processes*. 2017; 182–186. (In Russ.)]
3. Мязин В.П., Литвинцева О.В., Закиева Н.И. *Технология обогащения золотосодержащих песков: учебное пособие*. Чита: ЧитГУ; 2006. 110 с.
[Myazin V.P., Litvinseva O.V., Zakieva N.I. *Technology of enrichment of gold-bearing sands: textbook*. Chita: ChitGU; 2006. 110 p. (In Russ.)]
4. Ван-Ван-Е А.П., Литвинцев В.С., Секисов Г.В. Состояние и развитие ресурсного потенциала золотодобывающей отрасли ДФО. *Горный информационно-аналитический бюллетень. Дальний Восток-2*, 2009; 32–36.
[Van-Van-Ye A.P., Litvintsev V.C., Sekisov G.V. State and development of the resource potential of the gold mining industry of the Far Eastern Federal District. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. Dalniy Vostok-2*, 2009;32–36. (In Russ.)]
5. Медков М.А., Крысенко Г.Ф., Эпов Д.Г., Юдаков А.А. Переработка техногенного золотосодержащего сырья. *Вестник ДВО РАН*. 2010;(5):75–79.
[Medkov M.A., Krysenko G.F., Epov D.G., Yudakov A.A. Processing of aurum-containing technogenic waste. *Vestnik DVO RAN*. 2010;(5):75–79. (In Russ.)]
6. Шохин В.Н., Лопатин А.Г. *Гравитационные методы обогащения*. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1993. С. 300–301.
[Shokhin V.N., Lopatin A. G. *Gravitational enrichment methods*. Textbook for high schools. 2nd ed., revised. and additional. M.: Nedra; 1993. P. 300–301. (In Russ.)]
7. Федотов К.В., Тютюнин В.В. *Обогащение в центробежных концентраторах*: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ; 2009. 120 с.
[Fedotov K.V., Tyutyunin V.V. *Enrichment in centrifugal concentrators*: monograph. Irkutsk: Izd-vo IrGTU; 2009. 120 p. (In Russ.)]
8. Афанасенко С.И. Применение центробежных концентраторов ИТОМАК с автоматической системой управления на действующих предприятиях. *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья*. 2020; С. 272–274.
[Afanasenko S.I. Application of ITOMAK centrifugal concentrators with an automatic control system at operating enterprises. *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials*. 2020; P. 272–274. (In Russ.)]
9. Афанасенко С.И. и др. Центробежный концентратор «КРЦ-400» с планетарным движением рабочего конуса. *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья*. 2020; С. 275–278.
[Afanasenko S.I. et al. Centrifugal concentrator «KRC-400» with planetary movement of the working cone. *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials*. 2020; P. 275–278. (In Russ.)]
10. Пелих В.В., Салов В.М. Специфика применения центробежных сепараторов Кнелсон с периодической разгрузкой. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015;107(12):229–235.
[Pelikh V. V., Salov V. M. Application specifics of Knelson centrifugal separators with periodic discharge. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015;107(12):229–235. (In Russ.)]
11. Шохин В.Н., Лопатин А.Г. *Гравитационные методы обогащения*. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1993. С. 293–295.
[Shokhin V.N., Lopatin A. G. *Gravitational enrichment methods*. Textbook for high schools. 2nd ed., revised. and additional. M.: Nedra; 1993. P. 293–295. (In Russ.)]

12. Суримбаев Б.Н. и др. Оценка гравитационной обогатимости золотосодержащей руды—GRG. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):92–103.

[Surimbaev B.N. et al. Estimation of the gravity concentration of gold ore – GRG. *Mining Science and Technology*. 2020;5(2):92–103. (In Russ.)]

13. Сенченко А.Е. и др. Технологическая оценка обогатимости руды гравитационными методами. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2020;(4):262–280.

[Senchenko A.Ye. et al. Technological assessment of ore concentration by gravity methods. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020;(4):262–280. (In Russ.)]

14. Ярмола Д.А., Афанасенко С.И., Лазариди А.Н. Теоретический анализ процесса обогащения в центробежном концентраторе с горизонтальной осью вращения. *Сборник материалов Международной конференции «Перспектив Свободный-2016»*. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15–25 апреля 2016. Красноярск; 2016. С. 50–52.

[Yarmola D.A., Afanasenko S.I., Lazaridi A.N. Theoretical analysis of the enrichment process in a centrifugal concentrator with a horizontal axis of rotation. *Materials of the International conference «Prospect Svobodny-2016»*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, April 15–25, 2016. Krasnoyarsk; 2016. P. 50–52. (In Russ.)]

15. Богданович А.В., Петров С.В. Сравнительные испытания центробежных концентраторов различных типов. *Обогащение руд*. 2001(3):38–42.

[Bogdanovich A.V., Petrov S.V. Comparative tests of centrifugal concentrators of various types. *Obogashchenie rud*. 2001(3):38–42. (In Russ.)]

16. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. *Технология обогащения золотосодержащего сырья*: Учебное пособие для вузов. М.: Изд. дом «МИСиС»; 2011. С. 116–122.

[Bocharov V.A., Ignatkina V.A. *Technology of enrichment of gold-bearing raw materials*: Textbook for universities. M.: Izd. dom «MISiS», 2011. P. 116–122 (In Russ.)]

17. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. *Технология обогащения золотосодержащего сырья*: Учебное пособие для вузов. М.: Изд. дом «МИСиС»; 2011. С. 122–126.

[Bocharov V.A., Ignatkina V.A. *Technology of enriching gold-containing raw materials*: A textbook for universities. M.: Izd. dom «MISiS»; 2011. P. 122–126. (In Russ.)]

18. Очосов О.Ю., Матвеев А.И. Повышение эффективности разделения минеральных частиц под действием центробежных сил за счет использования направленных вибрационных колебаний. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(10): 259–265.

[Ochoso O.Yu., Matveev A.I. Higher efficiency of mineral particle segregation under centrifugal forces due to directional vibration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016; (10):259–265. (In Russ.)]

19. Очосов О.Ю., Матвеев А.И. Изучение влияния вибрационных колебаний на процесс концентрации тяжелых минералов под действием центробежной силы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(9):179–185.

[Ochoso O.Yu., Matveev A.I. Effect of vibrations on concentration of heavy minerals under action of centrifugal force. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018(9):179–185. (In Russ.)]

20. RU Российская Федерация, Пат. 2535323 С2, МПК В03 5/32 *Центробежно-вибрационный концентратор для разделения материалов* / Очосов О.Ю., Матвеев А.И.; заявитель и патентообладатель Учреждение Рос. акад. наук Ин-т горн. дела Севера им. Н.В. Черского Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. – № 2013109952/03; заявл. 05. 03. 2013; опубл. 10. 12. 2014, Бюл. №34.

[RU Russian Federation, Pat. 2535323 C2, МПК В03 5/32 *Centrifugal-vibratory concentrator for material separation* / Ochoso O.Yu., Matveev A.I.; applicant and patentee N.V. Chersky Institute of Mining of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. - No. 2013109952/03; dec. 03/05/2013; publ. 10. 12. 2014, Bull. No. 34. (In Russ.)]

Об авторах

ОЧОСОВ Олег Юрьевич, старший инженер, e-mail: ochos@mail.ru

МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич, доктор технических наук, зав. лаб., Author ID: 7102723417, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, e-mail: andrei.mati@yandex.ru

Аффилиация

Институт горного дела им. Н.В. Черского, Сибирское отделение РАН, 677018, г. Якутск, пр. Ленина, 43, Российская Федерация

About the authors

OCHOSOV, Oleg Yurievich, Senior Engineer, e-mail: ochos@mail.ru

MATVEEV, Andrey Innokentevich, Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory, Author ID: 7102723417, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, e-mail: andrei.mati@yandex.r

Affiliation

Chersky Institute of Mining of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 43 Lenina pr., Yakutsk 677018, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 21.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 17.10.2022

Принята к публикации / Accepted 26.11.2022