

Динамическое моделирование подвижности минеральной постели в центробежных концентраторах

М.А. Перепелкин¹ ✉, В.И. Склянов²

¹ Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация

² Норильский государственный индустриальный институт, г. Норильск, Российская Федерация

✉ mihailfw@icloud.com

Резюме: В статье рассматривается метод определения эффективных параметров работы центробежных концентраторов с флюидизацией минеральной постели водой через отверстия в стенках вращающегося конуса. Описаны устройство и принцип работы лабораторной установки для изучения стесненного движения минеральных частиц в центробежном поле. Также рассмотрена оптимизация степени разрыхленности минеральной постели в центробежном концентраторе. Экспериментальным путем установлено, что при существующих значениях расхода воды минеральная постель находилась в состоянии, близком к запрессованному. В лабораторных условиях с использованием разработанного способа оптимизации соотношения давления воды в системе флюидизации и фактора разделения было рассчитано оптимальное давление воды и её расход. В результате удалось поднять извлечение в первой стадии гравитационного обогащения на 2%. Таким образом, определено, что степень разрыхленности зависит от соотношения фактора разделения и давления воды в системе флюидизации. На основе предложенного подхода возможно разработать систему автоматизации по настройке параметров работы центробежных концентраторов. По результатам расчета баланса по обогатительному переделу золотоизвлекательной фабрики месторождения «Кедровское» установлено, что применение предлагаемой методики позволило повысить эффективность работы центробежного безнапорного концентратора.

Ключевые слова: гравитационные методы обогащения, центробежная сепарация, центробежные концентраторы, флюидизация, фактор разделения, обогащение золота

Для цитирования: Перепелкин М.А., Склянов В.И. Динамическое моделирование подвижности минеральной постели в центробежных концентраторах. *Горная промышленность*. 2021;(2):114–119. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-114-119.

Dynamic modeling of mineral bed mobility in centrifugal concentrators

M.A. Perepelkin¹ ✉, V.I. Sklyanov²

¹ Northeastern State University, Magadan, Russian Federation

² Norilsk State Industrial Institute, Norilsk, Russian Federation

✉ mihailfw@icloud.com

Abstract: The article discusses a method for determining the effective parameters of centrifugal concentrators with fluidization of a mineral bed with water through holes in the walls of a rotating cone. The device and the principle of operation of a laboratory setup for studying the constrained movement of mineral particles in a centrifugal field are described. Also, the optimization of the degree of loosening of the mineral bed in the centrifugal concentrator is considered. It was established experimentally that with existing water flow rates the condition of the mineral bed was close to the pressed state. Using the developed method of optimizing the ratio of water pressure in the fluidization system and the separation factor, the optimum water pressure and its flow rate were calculated in laboratory conditions. As a result, it was possible to raise the extraction during the first stage of gravity concentration by 2%. Therefore, it was determined that the degree of loosening depends on the correlation of the separation factor and the water pressure in the fluidization system. Based on the proposed approach, it is possible to develop an automation system to adjust the parameters of the centrifugal concentrators. Based on the results of calculating the balance of the concentration process in the gold extraction plant at the Kedrovskoe deposit, it was established that the application of the proposed methodology helped to improve the efficiency of the centrifugal free-flow concentrator.

Keywords: gravity beneficiation methods, centrifugal separation, centrifugal concentrators, fluidization, separation factor, gold beneficiation

For citation: Perepelkin M.A., Sklyanov V.I. Dynamic modeling of mineral bed mobility in centrifugal concentrators. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(2):114–119. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-114-119.

Введение

Наиболее эффективным способом гравитационного обогащения является центробежная сепарация, получившая широкое применение на рудных и россыпных месторождениях различных плотных минералов в связи с относительно низкими капитальными и эксплуатационными затратами, простой технологичностью и экологичностью. Чаще других применяются центробежные концентраторы с разрыхлением постели водой, подаваемой с внешней стороны конуса через отверстия в нём.

Общая часть

Для определения эффективных параметров работы центробежных концентраторов был разработан метод, основанный на полуэмпирической модели, часть параметров которой задается с помощью специальной установки (рис. 1). Данная установка имеет аналоговую видеокамеру 1 и радиопередатчик 2 для передачи сигнала с видеокамеры, расположенной над объектом исследований, в компьютер в виде потока графического материала, отражающего состояние минеральной постели в центробежном поле.

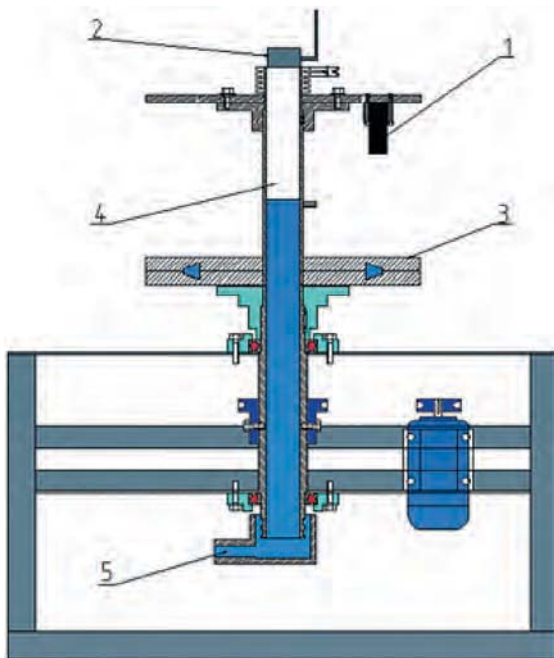


Рис. 1
Лабораторная установка для изучения стесненного движения минеральных частиц в центробежном поле:
1 – аналоговая видеокамера;
2 – радиопередатчик;
3 – прозрачная кювета из оргстекла; 4 – полый вал;
5 – штуцер с сальниковым уплотнением для подачи воды

Fig. 1
Laboratory device to study the constricted movement of mineral particles in the centrifugal force field:
1 – analog video camera;
2 – radio transmitter;
3 – transparent plexiglass tray; 4 – hollow shaft;
5 – connection with a gland seal for water supply

На центральном валу установки размещается прозрачная кювета из оргстекла 3, внутреннее устройство которой полностью моделирует и по масштабам, и по конструкции зону флюидизации центробежного концентратора с разрыхлением постели водой, подаваемой с внешней стороны конуса через отверстия в нём. Кювета на 80% от её объема заполняется смесью минеральных частиц, движение которых требуется изучить в центробежном поле. Вода под давлением нагнетается в полый вал 4 установки через не-

подвижный штуцер 5 с сальниковым уплотнением, откуда она поступает в кольцевой канал 6 кюветы (рис. 2). Из кольцевого канала 6 через флюидизационные отверстия 7 вода поступает в зону флюидизации постели 8, где находится смесь минералов. Сбор воды происходит в камере 10, откуда она выводится из установки. Для того чтобы минеральная смесь не вымывалась из зоны флюидизации постели, в кювете установлена сетка с ячейкой 0,040 мм.

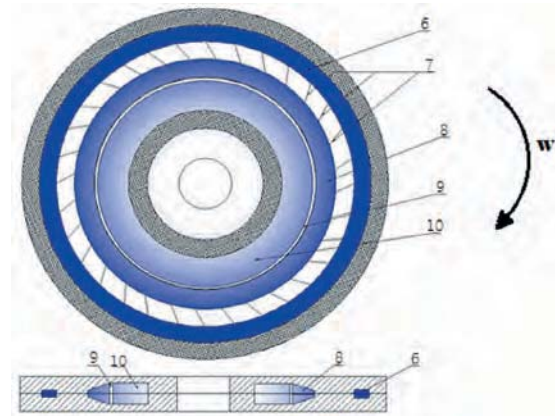


Рис. 2
Кювета из оргстекла:
6 – кольцевой канал;
7 – флюидизационные отверстия; 8 – зона флюидизации постели;
9 – сетка с ячейкой 40 мкм;
10 – камера для сбора воды

Fig. 2
Plexiglass tray:
6 – circular channel;
7 – fluidization holes;
8 – bed fluidization zone;
9 – 40 µm mesh mesh;
10 – water collection chamber

Эксперименты по разделению проводились на двух смесях (кварц + магнетит, кварц + вольфрамит). Аналоговая видеокамера позволяет воспроизвести картину процесса разделения минеральных частиц в центробежном поле. При этом в процессе эксперимента изменяются как величина фактора разделения установки (угловая скорость кюветы), так и давление в системе флюидизации кюветы. Полученные изображения динамической картины процесса разделения минеральных частиц позволяют судить о состоянии минеральной постели в зонах флюидизации (рифках) центробежных концентраторов и рассчитать степень разрыхленности минерального слоя.

По результатам эксперимента в зоне флюидизации центробежного концентратора было установлено наличие двух видов течений (рис. 3): циркуляционные и локальные, а также поток Кориолиса.

Образование закрученных турбулентных вихрей в слое минеральной постели (циркуляционные течения) происходит в результате подачи флюидизирующей воды. Эти вихри возникают как следствие наложения друг на друга двух течений – течения воды из флюидизационных отверстий и внешнего течения пульпы, проходящего по образующей зоны флюидизации центробежного концентратора.

Локальные течения (не отмечены на рис. 3) вызваны турбулентными пульсациями и столкновениями частиц, они носят случайный и беспорядочный характер.

Поток Кориолиса имеет движение, не совпадающее с направлением вращения установки. Видеосъемка показала, что минеральные частицы движутся противоположно внешнему течению. Данная картина наблюдается прежде всего за счет того, что частицы не успевают приобрести скорость потока, так как находятся в роторе центробежного концентратора очень малое время, а также потому, что

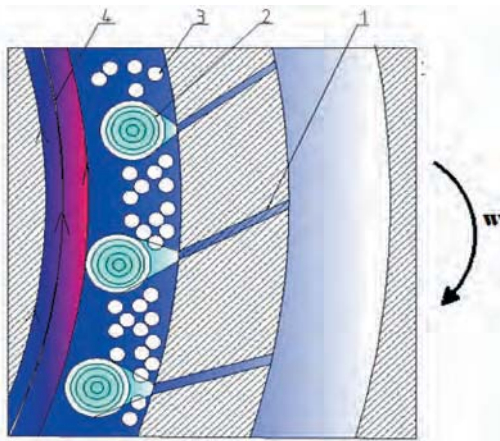


Рис. 3
Течения и потоки в зоне флюидизации центробежного концентратора:
1 – флюидизационные отверстия; 2 – циркуляционные отверстия; 3 – минеральные частицы; 4 – поток Кориолиса

Fig. 3
Streams and flows in the fluidization zone of the centrifugal concentrator:
1 – fluidization holes; 2 – circulation holes; 3 – mineral particles; 4 – Coriolis flow

большое влияние на движение минеральных частиц оказывает сила Кориолиса, векторная составляющая которой направлена навстречу вращению ротора и наличие которой подтверждено экспериментально видеосъемкой одиночных частиц, свободно падающих в центробежном поле [1].

В результате наблюдения за состоянием минеральной постели в зоне флюидизации центробежного концентратора была построена эпюра скоростей флюидизирующего потока по её периметру, подчиняющаяся синусоидальному закону (рис. 4). Высотой пиков синусоиды P можно управлять с помощью давления воды в системе флюидизации, шаг между пиками Δ задается конструктивными параметрами системы флюидизации (шаг между флюидизирующими отверстиями на образующей конуса центробежного сепаратора).

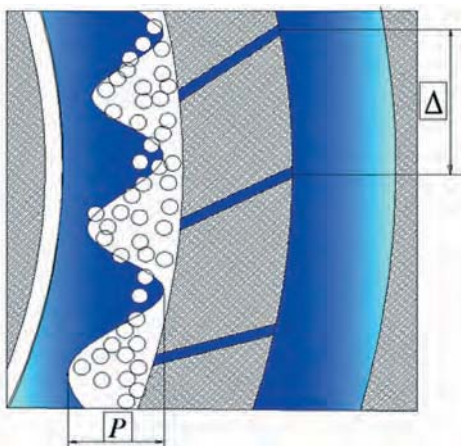


Рис. 4
Эпюра скоростей флюидизирующего потока

Fig. 4
Fluidizing flow velocity profile

Таким образом, степень разрыхленности постели в центробежных концентраторах можно описать при помощи следующей синусоидальной функции, %:

$$R = P \sin\left(\frac{2\pi}{c\Delta} \cdot x\right), \quad (1)$$

где P – функция, определяемая давлением воды;
 Δ – расстояние между флюидизационными отверстиями;
 x – координата точки, в которой определяется степень разрыхленности (запрессованности) минеральной постели;
 c – эмпирическая константа, задаваемая исходя из конструктивных особенностей установки.

Степень разрыхленности постели – величина, представляющая собой массовую долю твердого в объеме постели, %, то есть:

$$R = \frac{S}{S+L} * 100, \quad (2)$$

где S – это количество твердой фазы, г;
 L – это количество жидкой фазы, г.

Параметр P косвенно определяет высоту пиков и принимается в расчётах на основе экспериментов, проведенных на установке (рис. 1). Параметр Δ определяется конструктивными параметрами центробежного концентратора и является расстоянием от центра одного флюидизационного отверстия до другого в миллиметрах.

Картина распределения минеральных частиц (рис. 5) по слоям в зоне флюидизации центробежного концентратора соответствует картине распределения минеральных частиц в замороженном конусе и в экспериментах, проведенных в работах [3] и [4]. Сформировавшуюся картину распределения минеральных частиц в зонах сбора тяжелых фракций центробежного концентратора можно описать следующим образом (рис. 5).

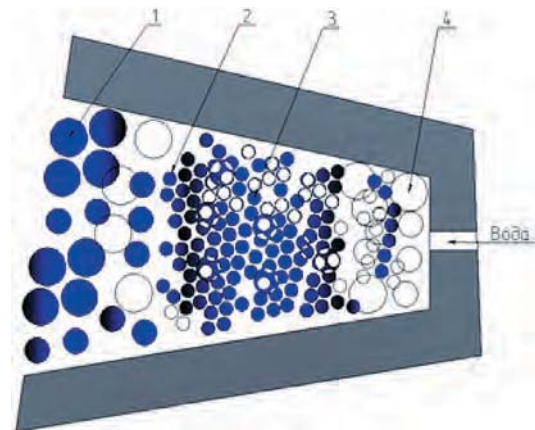


Рис. 5
Образование слоев минеральной постели в зоне флюидизации центробежного концентратора:
1 – крупные и средние частицы тяжелых минералов;
2 – крупные частицы легких, средние и тонкие частицы тяжелых минералов;
3 – мелкие частицы тяжелых минералов;
4 – смесь крупных и мелких частиц пустой породы с единичными частицами тяжелых минералов

Fig. 5
Formation of the mineral bed layers in the fluidization zone of the centrifugal concentrator:
1 – large and medium-size particles of heavy minerals;
2 – large-size particles of light minerals; medium-size and fine particles of heavy minerals;
3 – small-size particles of heavy minerals;
4 – mixture of large and small-size particles of waste rock with individual particles of heavy minerals

В зависимости от величины давления воды в системе флюидизации возможно управлять степенью разрыхленности минеральных частиц в зонах флюидизации центробежных концентраторов. Если давление воды в системе флюидизации высокое, то наблюдается перемещение крупных частиц легких минералов в сторону флюидизи-

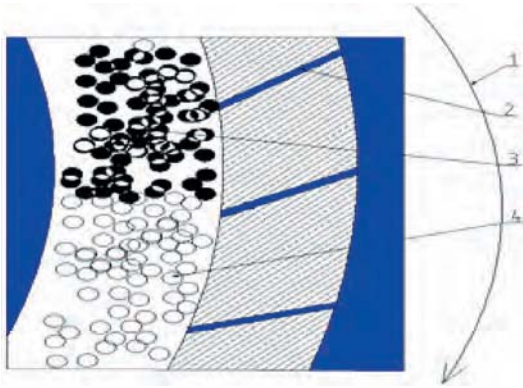


Рис. 6
Распределение минеральных зерен в сегменте кюветы:
1 – направление вращения;
2 – флюидизационные отверстия;
3 – тяжелые минералы;
4 – легкие минералы

Fig. 6
Distribution of mineral grains in a tray segment:
1 – direction of rotation;
2 – fluidization holes;
3 – heavy minerals;
4 – light minerals

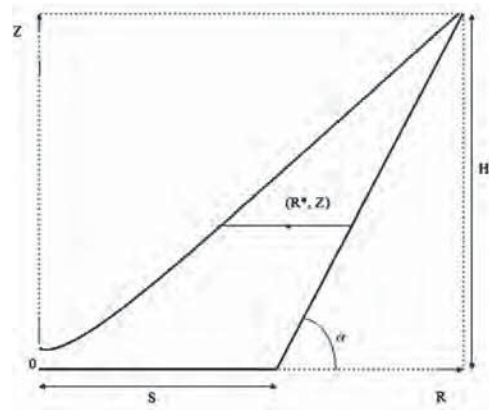


Рис. 7
Определение начальных условий движения частицы

Fig. 7
Determination of the initial conditions of particle movement

рующих каналов, где образуется слой из крупных легких частиц, на поверхности которого концентрируются мелкие частицы тяжелых минералов. Если давление воды в системе флюидизации имеет низкое значение, то можно наблюдать, как частицы тяжелых минералов проникают между крупными легкими частицами и движутся к флюидизирующим каналам.

Наблюдения за динамикой минеральных частиц в центробежном поле позволили разработать способ оптимизации давления воды во флюидизирующей системе конуса центробежного концентратора с разрыхлением постели водой, подаваемой против направления действия центробежного поля, через отверстия в нем. Она заключается в регулировании степени разрыхленности (за счет изменения давления воды во флюидизирующей системе центробежного концентратора) минеральной постели с целью наиболее эффективного улавливания частиц полезного компонента в зонах сбора тяжелой фракции с учетом расчетной частоты вращения конуса центробежного концентратора (фактора разделения), а также физических свойств минералов руды данного месторождения, на которой требуется произвести оптимизацию процесса сепарации.

В ходе проведения экспериментов по изучению динамики минеральных частиц в центробежном поле в кювете другой геометрической конфигурации, представляющей собой сегмент флюидизирующей ячейки, нами был зафиксирован процесс перераспределения минеральных зерен. Он заключался в том, что все тяжелые минеральные частицы двигались в направлении действия силы Кориолиса, что указывает на важную роль данной силы в процессах центробежной сепарации минерального сырья, так как она оказывает реальное воздействие на процесс разделения (рис. 6). С целью оценки возможности управления степенью разрыхленности постели в центробежном концентраторе и, как следствие, эффективностью процесса обогащения предлагается следующий подход.

Оптимизация степени разрыхленности минеральной постели в центробежном концентраторе

Оптимизация проводится в два этапа:

Первый этап. С применением численной модели расчета скорости свободного падения минеральных частиц [1] определяется минимально допустимая частота вращения ротора центробежного концентратора, при которой части-

цы достигают улавливающей ячейки. Начальное положение частицы задается координатами R^* и Z (рис. 7).

Так как толщина слоя пульпы, текущего по образующей конуса, изменяется, то координата R^* задается в процентном отношении по толщине потока пульпы, сформированного на поверхности конуса центробежного концентратора. В зависимости от координаты Z высчитывается абсолютное значение R . Геометрические свойства конуса задаются при помощи S и H . Эффективное значение фактора разделения G определяется программой в зависимости от радиуса конуса, в точке образующей которого частица находится в данный момент времени.

С учетом допущения того, что минеральная частица движется в условиях свободного падения, нами была составлена компьютерная программа, позволяющая оценить, при каких значениях фактора разделения будут улавливаться частицы тяжелого минерала определенной крупности (рис. 8). Математическая модель, заложенная в основу этой программы, подтверждается физическими экспериментами по измерению скорости свободного падения частиц в центробежном поле, приведенными в работе [1].

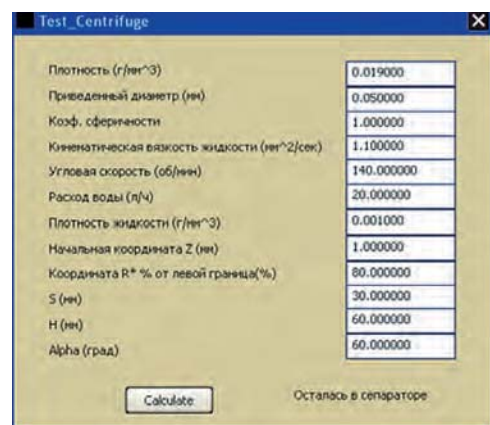


Рис. 8
Диалоговое окно программы для определения минимально-допустимых значений фактора разделения для извлечения частицы заданной крупности

Fig. 8
Program dialog window for determining the minimum permissible values of the separation factor for the extraction of a given particle size

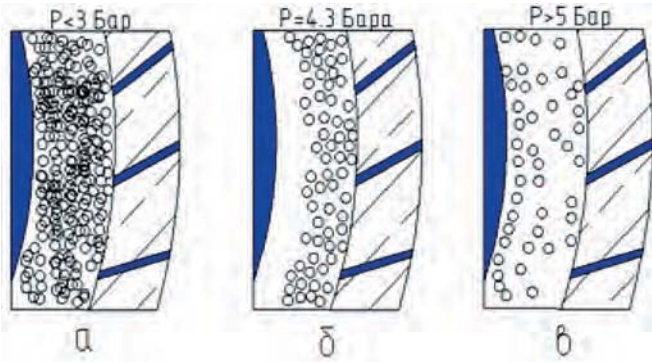


Рис. 9
Различные состояния постели в зависимости от давления во флюидизирующей системе:
а – запрессованное;
б – квазистационарное;
в – разрушение постели

Fig. 9
Different states of the bed depending on the pressure in the fluidizing system:
а – pressed;
б – quasi-steady;
в – bed failure

Кривая стационарности

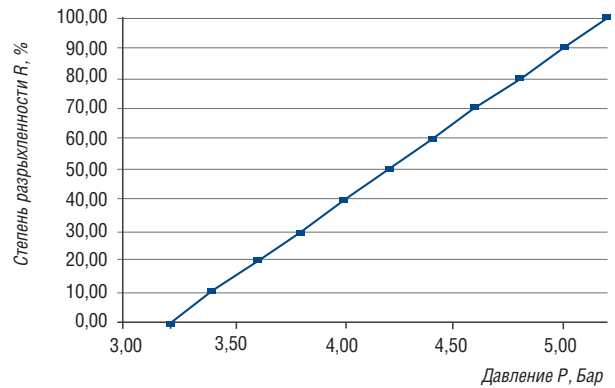


Рис. 10
Зависимость между степенью разрыхленности постели и давлением в системе флюидизации центробежного концентратора (фактор разделения $G = 30$)

Fig. 10
Dependence between the degree of bed loosening and pressure in the fluidization system of the centrifugal concentrator (separation factor $G = 30$)

Второй этап. С помощью установки (см. рис. 1) определяется соотношение фактора разделения и давления воды во флюидизирующей системе на основе допущения о том, что эффективное улавливание частиц полезного компонента происходит при квазистационарном состоянии (рис. 9, б) постели – состоянии, граничном между запрессовкой (рис. 9, а) и разрушением постели (рис. 9, в).

Наблюдения проводились на примере разделения (обогащения) реального минерального сырья. Частота вращения установки соответствует реальной частоте вращения центробежного концентратора, либо предварительно оптимизированной частоте вращения (этап 1). На рис. 10 представлена зависимость между степенью разрыхленности постели и давлением в системе флюидизации, полученные при разделении золото-кварцевого сырья (среднее значение $G = 30$).

Для апробации предлагаемого способа настройки цен-

тробежных концентраторов проведены промышленные испытания на обогатительной фабрике месторождения «Кедровское», Республика Бурятия.

Технологическая схема ЗИФ приведена на рис. 11. Объектом оптимизации был выбран центробежный сепаратор, перерабатывающий слив гидроциклона в цикле измельчения. Управляющим фактором оптимизации был принят расход воды, подаваемой на флюидизацию в центробежный концентратор.

Экспериментальным путем было установлено, что при существующих значениях расхода воды минеральная постель находилась в состоянии, близком к запрессованному. В лабораторных условиях с использованием разработанного способа оптимизации соотношения давления воды в системе флюидизации и фактора разделения было рассчитано оптимальное давление воды и её расход. В результате удалось поднять извлечение в первой стадии гравитацион-

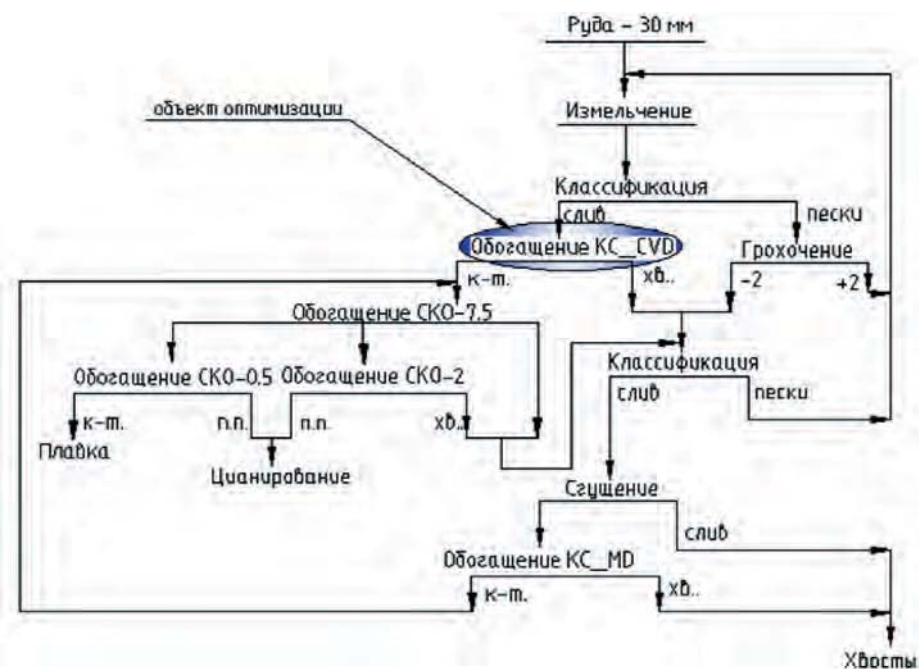


Рис. 11
Технологическая схема гравитационного передела руды месторождения «Кедровское»

Fig. 11
Technological flowchart of gravity ore processing at the Kedrovskoe deposit

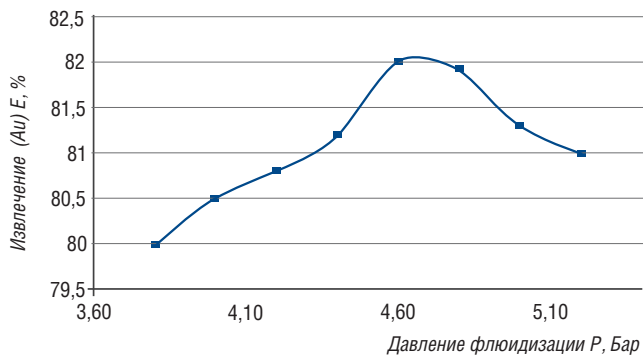


Рис. 12
Зависимость извлечения золота в центробежном концентраторе КС-CVD от давления воды в системе флюидизации

Fig. 12
Dependence of gold recovery in the KC-CVD centrifugal concentrator on the water pressure in the fluidization system

ного обогащения на 2%. Зависимость извлечения золота в концентрат от давления воды в системе флюидизации центробежного концентратора представлена на рис. 12.

По результатам расчета баланса по всему обогатительному переделу золотоизвлекательной фабрики месторождения «Кедровское» установлено, что применение предлагаемой методики позволило повысить эффективность работы центробежного безнапорного концентратора.

Выводы

1. Степень разрыхленности минеральной постели в центробежных концентраторах зависит от соотношения фактора разделения и давления воды в системе флюидизации.

2. На основе предложенного подхода возможно разработать систему автоматизации по настройке параметров работы центробежных концентраторов.

Список литературы

1. Федотов К.В., Тютюнин В.В. Свободное падение частиц в центробежном поле. *Обогащение руд*. 2009;(2):27–31. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/606/article/7356/>
2. Федотов К.В., Тютюнин В.В. *Обогащение в центробежных концентраторах*. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. техн. ун-та; 2008. 120 с.
3. Федотов К.В., Романченко А.А. Механизм сепарации золотосодержащего минерального сырья в безнапорном центробежном сепараторе. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2003;(9):80–85.
4. Богданович А.В., Васильев А.М. Исследование работы гравитационных сепараторов для обогащения тонкозернистых материалов. *Обогащение руд*. 2005;(1):12–15. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1123/article/18849/>

References

1. Fedotov K.V., Tyutyunin V.V. Free fall of particles in centrifugal field. *Obogashchenie Rud*. 2009;(2):27–31. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/606/article/7356/>
2. Fedotov K.V., Tyutyunin V.V. *Ore dressing in centrifugal concentrators*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2008. 120 p. (In Russ.)
3. Fedotov K.V., Romanchenko A.A. Separation mechanism of gold-bearing minerals in an free-flow centrifugal separator. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie = Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2003;(9):80–85. (In Russ.)
4. Bogdanovich A.V., Vasilyev A.M. Study of operation of gravity separators designed to concentrate fine-grained. *Obogashchenie Rud*. 2005;(1):12–15. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1123/article/18849/>

Информация об авторах

Перепелкин Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, доцент кафедры горного дела, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: mihaillfw@icloud.com.

Склянов Владимир Иванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых, Норильский государственный индустриальный институт, г. Норильск, Российская Федерация; e-mail: vladimir-sklyanov@yandex.ru.

Information about the authors

Mikhail A. Perepelkin – candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Road Transport, Associate Professor of the Department of Mining, North-East State University, the city of Magadan, Russian Federation; e-mail: mihaillfw@icloud.com.

Vladimir I. Sklyanov – candidate of technical sciences, head of the department of development of mineral deposits, Norilsk State Industrial Institute, Norilsk, Russian Federation; e-mail: vladimir-sklyanov@yandex.ru.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 26.03.2021
Поступила после рецензирования: 02.04.2021
Принята к публикации: 06.04.2021

Article info

Received: 26.03.2021
Revised: 02.04.2021
Accepted: 06.04.2021