УДК 622.755

О.Ю. Очосов, А.И. Матвеев

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРОЦЕСС КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МИНЕРАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ

Аннотация. Проведено исследование влияния направленных вибрационных колебаний на минеральную постель в поле действия центробежной силы для разработки и изготовления центробежно-вибрационного концентратора. По ранее проведенным исследованиям было определено направление вибрационных колебаний, при котором сегрегация минеральной постели происходит максимально быстро. В последующем, основываясь на этом эффекте разработан и создан центробежно-вибрационный концентратор, особенность которого заключается в том, что рабочий орган совершает вибрационные колебания, направленные вдоль оси своего вращения. Разработанная методика проведения испытаний позволила определить диапазоны рабочих параметров концентратора с использованием искусственной смеси. По методике определялся параметр извлечения тяжелых минералов в концентрат, по динамике которого оценивалось влияние вибрационных колебаний на минеральную постель. После неоднократных модификаций концентратора, проведены натурные испытания с использованием золотосодержащих песков, по результатам которых максимальное извлечение в концентрат составило 93,8%.

Ключевые слова: центробежный концентратор, обогащение, извлечение, вибрационные колебания, центробежная сила, постель тяжелых минералов, золото, концентрат, хвосты.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-179-185

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 [1, 2].

Использование центробежной силы позволяет обогащать мелкие и тонкие частицы золота с высокими миграционными свойствами в потоке воды с более высокой эффективностью, относительно оборудований, где разделение происходит под действием гравитационной силы тяжести. Но, в свою очередь конструкция безнапорных концентраторов отличается своей сложностью и соответственно высокой стоимостью. Помимо этого, сложность конструкции обуславливает особые требования к условиям эксплуатации и обслуживающему персоналу. По этим причинам проблемы обогащения мелкого и тонкого золота по сей день остаются актуальными [3]. По данной тематике проводились исследования, как отечественными, так и зарубежными специалистами [4—7].

Для наиболее широко распространенных безнапорных концентраторов,

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 9. С. 179–185.
© О.Ю. Очосов, А.И. Матвеев. 2018.

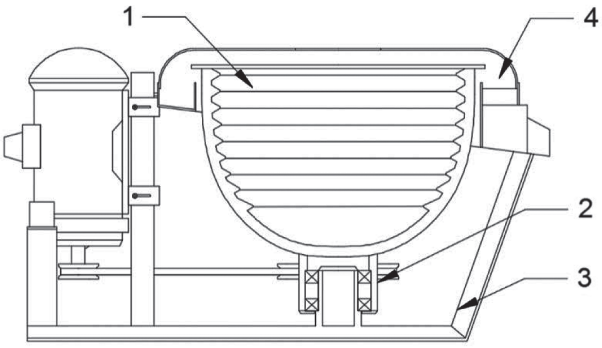

Рис. 1. Безнапорный центробежный концентратор: 1 — Рабочий орган в виде чаши; 2 — приводной вал с системой подшипников; 3 — несущая рама; 4 — устройство загрузки и разгрузки продуктов обогащения

Fig. 1. Gravity-flow centrifugal concentrator: 1 — active bowl-like member; 2 — drive shaft with bearings; 3 — supporting frame; 4 — feed-and-discharge device

работающих с использованием флюадизационного способа разрыхления минеральной постели, одним из важных условий эксплуатации, обеспечивающий эффективность его работы, является подача чистой воды [8], что в большинстве случаев при разработке россыпных месторождений представляет дополнительные затраты. В случае использования оборотной воды эффективность извлечения золота обеспечивают безнапорные центробежные концентраторы, работающие по вибрационному способу разрыхления минеральной постели за счет снятия излишней вязкости воды и нейтрализации влияния тонкодисперсных взвешенных шламов [9].

Принципиально конструкция безнапорных концентраторов остается однотипным, но отличаются формой улавливающей поверхности рабочего органа и способом разрыхления минеральной постели. Принципиальная конструкция безнапорных центробежных концентраторов представлена на рис. 1. Подобные аппараты, в основном, состоят из рабочего органа (ротора) в виде чаши или конуса *1*, который соединен с приводным валом и системой подшипников *2*, установленных на раме *3*, также в аппаратах имеются устройства для загрузки и разгрузки продуктов обогащения 4 [10].

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 уносятся смывным потоком пульпы за пределы рабочего органа.

В лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН по результатам ранее проведенных исследований по изучению влияния вибрационных колебаний на минеральную постель [11], 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 создан центробежно-вибрационный концентратор, главной особенностью, в отличие от существующих аналогов, является то, что рабочий орган совершает вибрационные колебания, направленных вдоль оси своего вращения.

Разработанный 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*, установленные в несущем корпусе. Центральный вал вместе с ротором и сердечником вращается с равной скоростью с приводным валом, посредством шпоночного или шлицевого соединения (не показан) 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*.

В данном аппарате постель тяжелых минералов под действием вибрационных колебаний рабочего органа переходит в состояние постоянной разрыхленности, что создает условия для сегрегационной концентрации тяжелых минералов в постели. Концентратор работает периодически, по истечении некоторого времени концентратор останавливают и производят разгрузку осевших тяжелых минералов в отдельный приемник.

Был изготовлен лабораторный вариант концентратора (рис. 3) [12], который в последующем модифицировался по мере проведения испытаний. Для проведения испытаний концентратора была разработана методика проведения исследований, позволяющая выявить влияния вибрационных колебаний

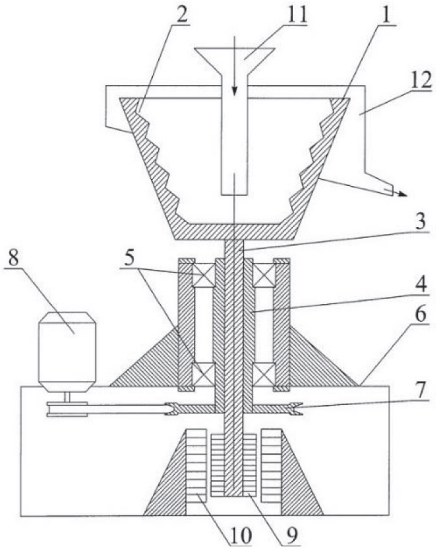

Рис. 2. Схема центробежно-вибрационного концентратора

Fig. 2. Scheme of vibratory–centrifugal concentrator

Рис. 3. Лабораторный центробежно-вибрационный концентратор

Fig. 3. Laboratory vibratory–centrifugal concentrator

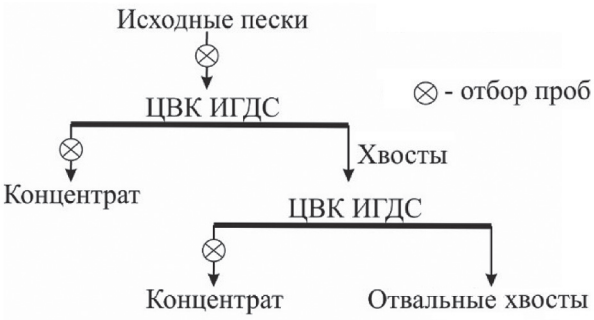

Рис. 4. Технологическая схема натурных испытаний
Fig. 4. Full-scale testing flow chart

направленного действия на концентрацию минеральных частиц под действием центробежных сил в улавливающей чаше концентратора, а также для определения рациональных технологических режимов его работы.

Для испытаний использовался искусственный материал. Параметры искусственного материала для исходного питания задавались таким образом, чтобы они максимально соответствовали технологическим характеристикам зернистых песков природного или техногенного происхождения. Наиболее распространенными технологическими параметрами песков природного или техногенного происхождения, поступающего на процесс центробежной концентрации имеют следующие показатели:

- крупность пустой породы от –2 (–1) мм и меньше, плотностью от 1 до 4 г/см^3;
- крупность тяжелых минералов от –2 (–1) мм и меньше, плотностью от 4 г/см^3 и более.

Для подготовки искусственной смеси исходного питания в качестве пустой породы использовался речной песок и магнетит в качестве тяжелых минералов, как наиболее доступные материалы, которые соответствуют по технологическим характеристикам для проведения исследований. При этом, использование магнетита в материале исходного питания позволяет оперативно провести анализ его содержания в продуктах разделения с использованием метода магнитной сепарации.

Учитывая динамику возрастания и убывания показателя извлечения тяжелых минералов проводилась оценка влияния задаваемых режимных параметров работы концентратора на процесс центробежной концентрации.

Сводные результаты экспериментов
Summarized test data

Серия экспериментов №	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота колебаний, Гц	22	22	0	40	40	22	22	0
Частота оборотов ротора, об/мин	375	260	375	375	260	260	375	375
Технологические параметры								
Извлечение, %	93,8	79,0	74,3	88,7	92,8	26,7	46,0	35,6
Содержание Au в конц. г/т	560,8	567,0	555,9	790,9	543,0	69,0	114,1	91,6
Выход, г	86,2	76,0	82,0	59,4	87,0	213,1	221,3	195,5

Первые испытания концентратора показали возможность извлечения тяжелых минералов с использованием искусственных смесей на уровне 64%. Были определены диапазоны рабочих параметров концентратора, при которых наблюдалось повышение уровня извлечения. По завершению предварительных испытаний были проведены натурные испытания с использованием песка с содержанием мелкого и тонкого золота. Технологическая схема натурных испытаний с точками отбора проб показана на рис. 4.

В таблице приведены сводные результаты расчетов извлечения, качественно количественные показатели полученных объединенных концентратов и основные параметры работы концентратора.

Из таблицы видно, что максимальное извлечение, которое удалось достичь, составило 93,8% при содержании золота в концентрате 560,8 г/т.

Данный результат показывает эффект действующего механизма перечистки концентрата за счет поддержания состояния эффективной разрыхленности постели, что заложено в конструкцию и принцип работы разработанного концентратора. Дальнейшие исследования в области усовершенствования конструкции аппарата позволят устранить недостатки, свойственные центробежным аппаратам с флюидизационным способом разрыхления минеральной постели.

Результаты исследований позволяют масштабировать и проектировать концентратор повышенной производительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шохин В.Н., Лопатин А.Г.* Гравитационные методы обогащения. Учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1993. — С. 300—301.

2. *Федотов К.В., Тютюнин В.В.* Обогащение в центробежных концентраторах: монография. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009 — 120 с.

3. *Мязин В.П., Литвинцева О.В., Закиева Н.И.* Технология обогащения золотосодержащих песков: учебное пособие. — Чита: ЧитГУ, 2006. — 110 с.

4. *Uslu T., Celep O.* Enrichment of low-grade colemanite concentrate by Knelson Concentrator // Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, March 2015. vol. 115. Pp. 229—233.

5. *Woodcock F.C., Laplante A.R.* Use of a Knelson unit to quantify gravity recoverable gold in an ore. Institute: McGill University (Canada), dissertation year: 1996.

6. *Солоденко А.А.* Испытания на эффективность центробежных концентраторов Falcon при обогащении золотосодержащей руды коренного месторождения // Цветная металлургия. — 2012. — № 6. — С. 39—41.

7. *Очосов О.Ю., Матвеев А.И.* Разделение минеральных частиц в поле действия центробежных сил и вибрационных колебаний / Сборник трудов конференции «Проблемы горных наук: Взгляд молодых ученых». — Якутск: изд-во «Ахсаан», 2014. — С. 76—79.

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

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

10. *Шохин В.Н., Лопатин А.Г.* Гравитационные методы обогащения. Учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1993. — С. 293—295.

11. *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. — С. 259—265.

12. *Очосов О.Ю., Матвеев А.И.* Патент № 2535323 Российская Федерация, МПК B03B 5/32. Центробежно-вибрационный концентратор для разделения минералов; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН. № 2013109952/03; заявл. 05,03,2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Очосов Олег Юрьевич[1] — старший инженер, e-mail: ochos@mail.ru,
Матвеев Андрей Иннокентьевич[1] — доктор технических наук,
зав. лабораторией, e-mail: andrei.mati@yandex.ru,
[1] Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 9, pp. 179–185.

Effect of vibrations on concentration of heavy minerals under action of centrifugal force

Ochosov O.Yu.[1], Senior Engineer, e-mail: ochos@mail.ru,
Matveev A.I.[1], Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory,
e-mail: andrei.mati@yandex.ru,
[1] Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 677018, Yakutsk, Russia.

Abstract. Effect of directional vibrations on a mineral bed in the field of centrifugal force is investigated with a view to developing and manufacturing a vibratory–centrifugal concentrator. The earlier research determined direction of vibrations such that segregation of the mineral bed takes place at the highest rate. Later on, based on the found effect, the vibratory–centrifugal concentrator has been developed and manufactured. The feature of the concentration is vibrations generated by the active member along its axis of revolution. The developed testing procedure allows finding ranges of operating characteristics of the concentrator using an artificial mixture. For example, the parameter of recovery of heavy minerals in concentrate is determined, and the dynamics of this parameter is used to estimate effect of vibrations on the mineral bed. After a number of modifications, the concentrator is put under full-scale testing using gold-bearing sand; as a result, the maximum gold recovery in concentrates makes 93.8 %.

Key words: centrifugal concentrator, dressing, recovery, vibrations, centrifugal force, heavy mineral bed, gold, concentrate, tailings.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-179-185

REFERENCES

1. Shokhin V.N., Lopatin A.G. *Gravitatsionnye metody obogashcheniya*. Uchebnik dlya vuzov. 2-e izd. [Gravity concentration methods. Textbook for high schools. 2nd edition], Moscow, Nedra, 1993, pp. 300—301.

2. Fedotov K.V., Tyutyunin V.V. *Obogashchenie v tsentrobezhnykh kontsentratorakh*: monografiya [Dressing in centrifugal concentrators: monograh], Irkutsk, Izd-vo IrGTU, 200, 120 p.

3. Myazin V.P., Litvintseva O.V., Zakieva N.I. *Tekhnologiya obogashcheniya zolotosoderzhashchikh peskov*: uchebnoe posobie [Dressing technology for gold-bearing sand: Educational aid], Chita, ChitGU, 2006, 110 p.

4. *Uslu T., Celep O.* Enrichment of low-grade colemanite concentrate by Knelson Concentrator. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, March 2015. vol. 115. pp. 229—233.

5. Woodcock F.C., Laplante A.R. *Use of a Knelson unit to quantify gravity recoverable gold in an ore*. Institute: McGill University (Canada), dissertation year: 1996.

6. Solodenko A.A. Ispytaniya na effektivnost' tsentrobezhnykh kontsentratorov Falcon pri obogashchenii zolotosoderzhashchey rudy korennogo mestorozhdeniya [Efficiency tests of centrifugal concentrators Falcon in processing gold ore from primary deposit]. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2012, no 6, pp. 39—41. [In Russ].

7. Ochosov O.Yu., Matveev A.I. Razdelenie mineral'nykh chastits v pole deystviya tsentrobezhnykh sil i vibratsionnykh kolebaniy [Dissociation of mineral particles in the field of vibrations and centrifugal forces]. *Sbornik trudov konferentsii «Problemy gornykh nauk: Vzglyad molodykh uchenykh»*. Yakutsk, izd-vo «Akhsaan», 2014, pp. 76—79. [In Russ].

8. Bocharov V.A., Ignatkina V.A. *Tekhnologiya obogashcheniya zolotosoderzhashchego syr'ya*: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Gold material beneficiation technology. Higher educational aid], Moscow, Izd. dom «MISiS», 2011, pp. 116—122.

9. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. *Tekhnologiya obogashcheniya zolotosoderzhashchego syr'ya*: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Технология обогащения золотосодержащего сырья. Higher educational aid], Moscow, Izd. dom «MISiS», 2011, pp. 122—126.

10. Shokhin V. N., Lopatin A. G. *Gravitatsionnye metody obogashcheniya*. Uchebnik dlya vuzov. 2-e izd. [Gravity concentration methods. Textbook for high schools. 2nd edition], Moscow, Nedra, 1993, pp. 293—295.

11. Ochosov O. Yu., Matveev A. I. Povyshenie effektivnosti razdeleniya mineral'nykh chastits pod deystviem tsentrobezhnykh sil za schet ispol'zovaniya napravlennykh vibratsionnykh kolebaniy [Enhancing efficiency of dissociation of mineral particles under action of centrifugal forces using directional vibrations]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 10, pp. 259—265. [In Russ].

12. Ochosov O. Yu., Matveev A. I. *Patent RU 2535323 MPK V03V 5/32*, 10.12.2014.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕДУЦИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ПОПУТНОЙ УТИЛИЗАЦИЕЙ ЕГО ЭНЕРГИИ ПРИ ПОМОЩИ ДЕТАНДЕРА ОБЪЕМНОГО ТИПА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

(2018, № 5, СВ 18, 20 с.)

Белоусов Артем Евгеньевич[1] — аспирант, e-mail: belousovartemevg@gmail.com,
Самигуллин Гафур Халафович[1] — доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой, e-mail: samigullin_gch@spmi.ru,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.

Энергию сжатого природного газа, транспортируемого по системе газораспределения, возможно утилизировать попутно редуцированию при помощи детандеров, в частности при помощи детандеров объемного типа, которые, в сравнении с турбодетандерами, могут более успешно функционировать в условиях малых коммерческих расходов и перепадов давлений. Представлена экспериментальная установка, созданная авторами для изучения процессов, связанных с работой линии редуцирования газорегуляторного пункта, усовершенствованной при помощи детандера объемного типа, в условиях малых расходов и перепадов давлений. При помощи экспериментальной установки были проведены исследования и получены регрессионные модели для четырех диапазонов перепадов давлений. Необходимые характеристики, не полученные экспериментальным путем, были описаны путем обработки полученных моделей.

Ключевые слова: газораспределение, пункт редуцирования, газораспределительные станции, газорегуляторные пункты, неравномерность отбора газа, детандер, объемный тип.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF NATURAL GAS PRESSURE REDUCTION WITH ENERGY UTILIZATION PROCESS BY MEANS OF VOLUMETRIC EXPANDER IN CONDITIONS OF IRREGULARITIES

Belousov A.E.[1], Graduate Student, e-mail: belousovartemevg@gmail.com,
Samigullin G.K.[1], Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of Chair,
[1] Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

The energy of transported through the gas distribution system natural gas can be utilized by the means of installed in the reduction points expanders, in particular by the means of volumetric expanders, which, in comparison with turbo expanders, in conditions of small flow rates and pressures can operate more successfully. The article presents created by the authors an experimental plant for studying the processes associated with the operation of the gas control unit reduction line, modified with the adjustable volumetric expander, under conditions of low flow rates and low pressure drops. Using the experimental setup, for the four ranges of pressure differences regression models were obtained. The main characteristics that were not obtained experimentally were described through the processing of the obtained models.

Key words: distribution on natural gas, pressure reduction point, gas distribution station, gas control unit, gas consume irregularity, expander, volumetric type.