

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА КОНЕЧНЫЕ СКОРОСТИ СТЕСНЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ

П. М. Пеньков¹, Ю. П. Морозов¹, С. А. Прокопьев²

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия, office@ursmu.ru;

² ООО Научно-производственная компания «Спирит», Иркутск, Россия

Аннотация: Турбулизационные центробежные сепараторы широко используются при обогащении руд и техногенного сырья, содержащих тонкие частицы благородных металлов и минералов с повышенной плотностью. Отличительной особенностью данных аппаратов является способ подачи разрыхляющей воды через отверстия в турбулизаторе, установленном внутри вращающегося конуса. При анализе закономерностей турбулизационной центробежной сепарации определено, что в механизме формирования пристеночного слоя центробежного сепаратора значительную роль играет сегрегация материала, при которой тонкодисперсные частицы ценного компонента постепенно продвигаются вглубь пристеночного слоя. В уплотненном его состоянии мелкие частицы ценного компонента перемещаются по поверхности более крупных породных частиц, но, тем не менее, это перемещение ограничено действием сил сцепления и шероховатостью поверхности частиц. При турбулизации идет процесс разрыхления пристеночного слоя и изменение положения как частиц ценного компонента, так и породных частиц, вследствие чего те частицы, движение которых было затруднено до турбулизации, получают возможность продвижения в глубину паза. Достижение условий для эффективной сегрегации частиц в пазах турбулизационного центробежного сепаратора даст возможность реализовать его работу в накопительном режиме с получением богатой тяжелой фракции при высоком извлечении в нее тяжелых минералов. В свою очередь создание таких условий можно обеспечить путем оптимизации параметров разрыхления материала в пристеночном слое.

Ключевые слова: центробежная сепарация, вязкостное сопротивление среды, динамическое сопротивление среды, скорость стесненного движения частиц, динамический коэффициент вязкости, гравитационное обогащение, техногенное сырье, благородные металлы, частицы повышенной плотности.

Для цитирования: 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.

Influence of viscosity resistance on the final velocities of stressed motion of particles

P. M. Penkov¹, Yu. P. Morozov¹, S. A. Prokopyev²

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;

² LLC Research and Production Company "Spirit", Irkutsk, Russia

Abstract: Turbulizing centrifugal separators are widely used in the enrichment of ores and technogenic raw materials containing fine particles of noble metals and minerals with increased density. A distinctive feature of these devices is the way of supplying loosening water through the holes in the turbulizer, installed inside the rotating cone. When analyzing the laws of turbulent centrifugal separation it was determined that in the mechanism of formation of the near wall layer of the centrifugal separator a significant role is played by material segregation, in which the finely dispersed particles of the valuable component are gradually moving deeper into the near wall layer. In its compacted state, small particles of the valuable component move on the surface of larger rock particles, but, nevertheless, this movement is limited by the action of traction forces and the roughness of the surface of the particles. Turbulization loosens the near wall layer and changes the position of both valuable component particles and rock particles, so that those particles, whose movement was difficult before the turbulization, get the opportunity to move into the depth of the groove. Achievement of conditions for effective segregation of particles in grooves of turbulizing centrifugal separator will make it possible to realize its operation in accumulation mode with obtaining rich heavy fraction with high extraction of heavy minerals. In turn, creation of such conditions can be provided by optimizing the parameters of loosening of the material in the near wall layer.

Key words: centrifugal separation, viscous resistance of the medium, dynamic medium resistance, constrained particle velocity, dynamic viscosity coefficient, gravity enrichment, technogenic raw materials, noble metals, high density particles.

For citation: Penkov P. M., Morozov Yu. P., Prokopyev S. A. Influence of viscosity resistance on the final velocities of stressed motion of particles. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-1):119–126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_119.

Введение

Долгое время разделение минералов при гравитационном обогащении остается ведущей технологией для переработки минерального и техногенного сырья [1, 2]. Преимуществом гравитационного метода обогащения является его экологичность вследствие того, что данный метод не требует использования химических соединений [3, 4].

В последние годы динамично используются в практике обогащения новые аппараты с центробежным ускорением для разделения минеральных частиц [5–8]. Высокая интенсивность центробежного ускорения существующих обогатительных центробежных сепараторов дает возможность извлекать частицы крупностью менее десяти микрометров [9–11]. Закономерности разделения минеральных частиц в центробежном поле исследованы недостаточно, поэтому в условиях производственной необходимости приходится

улучшать центробежное обогащение опытным путем. Это в значительной степени замедляет данный процесс либо делает его трудоемким, длительным и экономически невыгодным. В результате того, что скорость свободного падения частицы является основным параметром, по которому производится расчет гравитационных процессов и аппаратов, повышенное внимание уделяется её изучению в центробежном поле [12, 13]. Таким образом, расчет результатов обогащения минералов в центробежном поле с использованием значений скорости свободного падения частиц позволит оптимизировать работу центробежных концентраторов и повысить эффективность гравитационных процессов [14].

Методика исследований

Движение частиц в гравитационных средах происходит под действием гравитационной силы и силы вязкостного

и динамического сопротивления среды [15–17].

Гравитационная сила

$$G_0 = \frac{\pi}{6} d(\rho - \Delta)g, \quad (1)$$

где d — диаметр частицы, м; ρ , Δ — соответственно, плотность частицы и среды, кг/м³; g — ускорение свободного падения, 9,81 м/с².

Сила вязкостного сопротивления среды

$$P_b = 3\pi\mu\vartheta d, \quad (2)$$

где μ — динамический коэффициент вязкости, для воды $\mu_0 = 0,001$ Нс/м²; ϑ — скорость движения частицы, м/с.

Сила динамического сопротивления среды

$$P_d = \frac{\pi}{16} \vartheta^2 d^2 \Delta. \quad (3)$$

При установившемся режиме, когда скорость движения ϑ равна конечной скорости движения частицы ϑ_0

$$P_d + P_b - G_0 = 0, \quad (4)$$

или

$$\vartheta_0^2 \frac{\pi}{16} d^2 \Delta + \vartheta_0 3\pi\mu\vartheta d - \frac{\pi}{6} d(\rho - \Delta)g = 0. \quad (5)$$

Решая полученное уравнение относительно ϑ_0 , для свободного движения частиц в среде получено выражение [18]:

$$\vartheta_0 = \frac{24}{d\Delta} \left(\sqrt{\mu^2 + \frac{d^3 \Delta (\rho - \Delta) g}{216}} - \mu \right). \quad (6)$$

В соответствии с уравнением (6) скорость свободного падения частиц диаметром d определяется плотностью среды Δ и динамическим коэффициентом вязкости μ .

Гравитационное разделение минералов осуществляется в условиях той или иной степени стесненности движе-

ния частиц, при которых увеличивается гидродинамическое сопротивление среды [16, 18].

Скорость стесненного движения частиц $\vartheta_{ст}$ (м/с) может быть определена по формуле [15, 16, 19]:

$$\vartheta_{ст} = \vartheta_0 \cdot \theta^m, \quad (7)$$

где θ — объемная концентрация жидкой фазы в пульпе; m — показатель степени, находящийся в пределах от 0,75 до 3.

Предлагается плотность среды разделения (Δ_{cp}) для стесненных условий определять как средневзвешенную плотность пульпы [19, 20]:

$$\Delta_{cp} = (1 - \theta)\rho + \theta\Delta. \quad (8)$$

В качестве динамического коэффициента вязкости в стесненных условиях используется коэффициент вязкости $\mu_{ст}$, учитывающий динамическую вязкость жидкой фазы и взаимодействие твердых частиц друг с другом.

Тогда скорость стесненного движения частиц $\vartheta_{ст}$ может быть определена в соответствии с уравнением [19, 20]:

$$\vartheta_{ст} = \frac{24}{d\Delta_{cp}} \left(\sqrt{\mu_{ст}^2 + \frac{d^3 \Delta_{cp} (\rho - \Delta_{cp})}{216}} - \mu_{ст} \right). \quad (9)$$

Для расчета $\vartheta_{ст}$ по формуле (9) необходимо определить $\mu_{ст}$.

Для тяжелосредних суспензий вязкость определяется в зависимости от объемной концентрации твердой фазы W по эмпирической формуле Ванда [16]

$$\mu_{ст} = \mu_0 (1 + 2,5W + 7,34W^2 + 16,2W^3), \quad (10)$$

где μ_0 — вязкость жидкой фазы, для воды $\mu_0 = 0,001$ Нс/м²; W — объемная концентрация твердого в пульпе.

Формула Ванда справедлива для суспензий, в которых твердая фаза представлена мелкими частицами крупностью менее 0,1 мм.

Твердая фаза пульпы при гравитационном разделении частиц представлена широким диапазоном крупности частиц. Влияние гранулометрического состава твердой фазы на вязкость пульпы исследована экспериментально.

Исследования выполнены с использованием капиллярного вискозиметра. В качестве исследуемого материала использованы классы крупности магнетита в диапазоне от 2 мм до 0,01 мм.

Вязкость пульпы определялась как относительная вязкость по сравнению с вязкостью воды по формуле:

$$\mu_{ст} = \frac{t_{п} \Delta_{сп}}{t_{в} \Delta_{в}} \cdot \mu_0, \quad (11)$$

где $t_{п}$ — продолжительность истечения через капилляр заданного объема пульпы, с; $t_{в}$ — продолжительность

истечения через капилляр того же объема воды, с; $\Delta_{в}$ — плотность воды, кг/м³.

Исследовано влияние объемной концентрации твердой фазы на динамический коэффициент вязкости $\mu_{ст}$. Массовая доля класса –0,1 мм в экспериментах изменялась в пределах от 20 до 100%. Опыты в каждом режиме повторялись по 5 раз. Относительная ошибка в определении $\mu_{ст}$ составляла менее 3%.

Результаты

Полученные результаты экспериментов после математической обработки приведены в таблице.

По полученным экспериментальным данным построены зависимости динамического коэффициента вязкости ($\mu_{ст}$) от объемной концентрации класса – 0,1 мм в твердой фазе ($W_{-0,1}$) при раз-

Таблица

Результаты экспериментов по определению динамического коэффициента вязкости пульпы $\mu_{ст}$
Results of experiments to determine the dynamic viscosity coefficient of the pulp $\mu_{ст}$

№ п/п	Объемная доля твердого, W	Объемная доля класса –0,1 мм, $W_{-0,1}$	$\mu_{ст}$, Нс/м ²
1	0	0	0,001
	0,1	1	0,00134
	0,2	1	0,00192
	0,3	1	0,00285
	0,4	1	0,00421
	0,7	1	0,01190
2	0	0	0,001
	0,1	0,6	0,00176
	0,2	0,6	0,00253
	0,3	0,6	0,00374
	0,4	0,6	0,00553
	0,7	0,6	0,01564
3	0	0	0,001
	0,1	0,2	0,00212
	0,2	0,2	0,00304
	0,3	0,2	0,00451
	0,4	0,2	0,00667
	0,7	0,2	0,01884

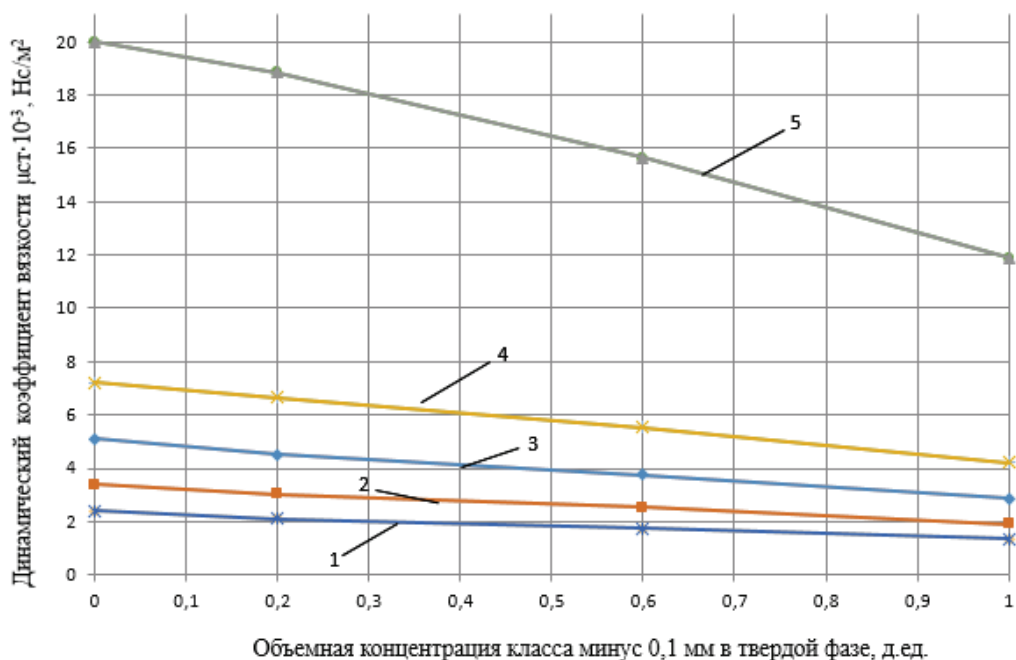


Рис. Зависимости динамического коэффициента вязкости (μ_{cm}) от объемной концентрации класса $-0,1$ мм в твердой фазе ($W_{-0,1}$) при различных значениях объемной доли твердого в пульпе: 1 — объемная доля твердого в пульпе 0,1; 2 — объемная доля твердого в пульпе 0,2; 3 — объемная доля твердого в пульпе 0,3; 4 — объемная доля твердого в пульпе 0,4; 5 — объемная доля твердого в пульпе 0,7

Dependences of the dynamic viscosity coefficient (μ_{cm}) on the volume concentration of the class -0.1 mm in the solid phase ($W_{-0,1}$) at different values of the volume fraction of solid in the pulp: 1 — volume fraction of solid in pulp 0,1; 2 — volume fraction of solid in pulp 0,2; 3 — volume fraction of solid in pulp 0,3; 4 — volume fraction of solid in pulp 0,4; 5 — volume fraction of solid in pulp 0,7

личных значениях объемной доли твердого в пульпе (рис.).

Обсуждение результатов

Установлено, что для частиц магнетита крупностью менее 2 мм в диапазоне объемной концентрации твердого в пульпе до 0,7 значения (μ_{cr}) увеличиваются с увеличением в пульпе объемной доли твердой фазы (W) и с уменьшением в твердой фазе объемной доли класса $-0,1$ мм ($W_{-0,1}$).

Значения (μ_{cr}) для конкретных условий с учетом полученных данных предлагается рассчитывать путем введения поправочного коэффициента на объем-

ную долю класса $-0,1$ мм в твердой фазе в уравнении Ванда:

$$\mu_{cr} = \mu_0 (1 + 2,5W + 7,34W^2 + 16,2W^3) K_{кр}, \quad (12)$$

где $K_{кр}$ — коэффициент, учитывающий объемную долю класса $-0,1$ мм в твердой фазе пульпы.

После математической обработки экспериментальных данных установлено, что зависимость $K_{кр}$ от $W_{-0,1}$ адекватно описывается уравнением:

$$K_{кр} = 1,7 - 0,56W_{-0,1} - 0,14W_{-0,1}^2. \quad (13)$$

Заключение

С учетом поправленного коэффициента $K_{кр}$ уравнение Ванда может быть

использовано для практического применения при расчете динамического коэффициента вязкости ($\mu_{ст}$) и конеч-

ных скоростей движения частиц в стесненных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *Кулибали Мусса, Чекушина Т. В., Янкевский А. В.* Повышение извлечения золота из бедных руд с помощью гравитации // Вестник Евразийской науки, 2021 №4. DOI: 10.15862/04NZVN421.

3. *Перепелкин М. А., Семькин Е. С., Мирошникова Л. К., Уфатова З. Г.* Моделирование процесса центробежной сепарации минеральных частиц в гравитационном поле с применением метода конечных элементов // Горная промышленность. 2022;(1):128–132. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-128-132.

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

5. *Пелих В. В., Салов В. М., Бурдонов А. Е., Лукьянов Н. Д.* Установление технологических зависимостей работы концентратора КС-CVD6 с помощью метода группового учета аргументов // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. №2. — С. 139–150. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2500.

6. *Шевченко А. С., Морозов Ю. П., Шаутонов М. Р., Хамидулин И. Х.* Инновационные технологии переработки вольфрамсодержащих хвостов обогатительной фабрики Жамбыл // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2020. — №3-1. — С. 443–452. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-443-452.

7. *Кускова Я. В.* Использование гравитационно-центробежных полей для повышения эффективности разделения мелких частиц гравитационным методом // Техника и технология горного дела. — 2018. — №3. — С. 29–42. DOI: 10.26730/2618-7434-2018-3-29-41.

8. *Прокопьев С. А., Гладкочуб Д. П., Шульгина М. Е., Прокопьев Е. С.* Технологические исследования по переработке лежалых и текущих хвостов золотоизвлекательной фабрики «Высочайший» (Иркутская область, г. Бодайбо) // Известия Иркутского Государственного Университета: Науки о земле. — 2017. — Т.22. — С. 92–103.

9. Патент РФ на изобретение № 2196004, приоритет от 21.03.2001, Бюлл. 2002 г. авторы: *Афанасенко С. И., Лазариди А. Н., Орлов Ю. А.*

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

11. *Meng Zhou, Ozan Kökkılıç, Raymond Langlois, Kristian E. Waters.* Size-by-size analysis of dry gravity separation using a 3-in. Knelson Concentrator // Minerals Engineering. 2016. Vol. 91. Pp. 42–54.

12. *Филиппов В. Е.* Экспериментальные исследования характера поведения минеральных частиц в гидроаэродинамической среде // В. Е. Филиппов, И. Ф. Лебедев, Н. Г. Еремеева, Д. М. Гаврильев; отв. ред. А. И. Матвеев; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела Севера им. Н. В. Черского. — Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2013. — 85 с.

13. *Ghaffari A., Farzanegan A.* An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modelling // Minerals Engineering. 2017. Vol. 112. Pp. 57–67.

14. *Fatahi M. R., Farzanegan A.* DEM simulation of laboratory Knelson concentrator to study the effects of feed properties and operating parameters // *Advanced Powder Technology* Vol. 28, Pp. 1443–1458, (Issue 6, June 2017).

15. *Тарасов В. К., Волгина Л. В.* Определение гидравлической крупности частиц, форма которых отличается от шарообразной // *Вестник МГСУ*, 2011, №8. — С.111–115.

16. *Слепцова Е. С., Никифорова Л. В., Яковлев Б. В., Матвеев А. И.* Математическое моделирование процесса концентрации тяжелых частиц в постели отсадочной машины // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. — 2014. — №10. — С. 239–245.

17. *Никифорова Л. В., Яковлев Б. В.* Теоретическое исследование процесса отсадки при обогащении полезных ископаемых // *Сильно коррелированные двумерные системы: от теории к практике. Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием (Якутск, 18–23 июня 2018 г.) / редкол.: Ю. М. Григорьев [и др.]*. — Якутск: Издательский дом СВФУ, 2018 — С. 107.

18. *Карлина А. И.* Изучение механизма процесса гравитационного обогащения и совершенствования математических моделей процессов // *Вестник Иркутского Государственного Технического Университета*. — 2015. — №2 (97). — С. 168–173.

19. *Морозов Ю. П.* Анализ гравитационного разделения минералов в стесненных условиях движения // *Известия вузов. Горный журнал*. №4, 2011 — С.93–98.

20. *Меринев Н. Ф.* Закономерности движения минеральных зерен в гравитационном поле // *Обогащение руд*, 2006, №4. — С.24–29. **МИАБ**

REFERENCES

1. Perpelkin M. A., Sklyanov V. I. Dynamic modeling of mineral bed mobility in centrifugal concentrators. *Mining*. 2021;(2):114–119. [In Russ].

2. Kulakova E. A. Development of an intelligent control system for the process of gravitational ore dressing. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy PhD Republic of Kazakhstan 2021. [In Russ].

3. Coulibaly Moussa, Chekushina T. V., Yankevsky A. V. Increasing the extraction of gold from low-grade ores using gravity. *Bulletin of Eurasian Science*, 2021 no. 4. [In Russ].

4. C. Marion, R. Langlois, O. Kökkılıç, M. Zhou, H. Williams, M. Awais, N. A. Rowson, K. E. Waters, 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. 139–135. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.023.

5. Pelikh Vladislav V., Salov Valery M., Burdonov Alexander E., Lukyanov Nikita D. Establishment of technological dependence of KC-CVD6 concentrator operation by means of the argument group accounting method. *Proceedings of Tomsk polytechnic university. Georesource engineering*. 2020. V. 331. no. 2. pp. 139–150. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2500. [In Russ].

6. Shevchenko A. S., Morozov Yu. P., Shautenov M. R., Hamidulin I. H. Innovative technologies for processing tungsten containing tails of the enrichment factory of Zhambyl. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3–1):443–452. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-443-452.

7. Yana Kuskova. Use of gravitational-centrifugal fields to increase the efficiency of small particles' separation by the gravity method. *Mining engineering and technology*. 2018. no. 3. pp. 29–42. DOI: 10.26730/2618-7434-2018-3-29-41. [In Russ].

8. Prokopiev S. A., Gladkochub D. P., Shulgina M. E., Prokopiev E. S. Technological research on processing of mature and fresh tailings of gmf vysochaishy (Irkutsk region, Bodaibo). *News of Irkutsk state university, series: Earth sciences*. 2017. V.22. pp. 92–103. [In Russ].

9. RF patent for invention no. 2196004, priority dated March 21, 2001, Bull. 2002 authors: Afanasenko S. I., Lazaridi A. N., Orlov Yu. A. [In Russ].

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

11. Meng Zhou, Ozan Kökkılıç, Raymond Langlois, Kristian E. Waters. Size-by-size analysis of dry gravity separation using a 3-in. Knelson Concentrator. *Minerals Engineering*. 2016. Vol. 91. pp. 42–54.

12. Filippov V.E. Experimental studies of the nature of the behavior of mineral particles in a hydroaerodynamic environment. V.E. Filippov, I.F. Lebedev, N.G. Eremeeva, D.M. Gavriliiev; resp. ed. A.I. Matveev; Ros. acad. Sciences, Sib. Department, Institute of Mining of the North. N.V. Chersky. Novosibirsk: Academic publishing house “Geo”, 2013. 85 p. [In Russ].

13. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modelling. *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 112. pp. 57–67.

14. Fatahi M.R., Farzanegan A. DEM simulation of laboratory Knelson concentrator to study the effects of feed properties and operating parameters. *Advanced Powder Technology* Vol. 28, pp. 1443–1458, (Issue 6, June 2017).

15. Tarasov V.K., Volgina L.V. Definition of hydraulic size solid particle non spherical form. *BULLETIN MSUCE*, 2011, no.8. pp. 111–115. [In Russ].

16. Sleptsova E.S., Matveev A.I., Nikiforova L.V., Yakovlev B.V. Mathematical modeling of the concentration of heavy particles in the bed jig. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014. no. 10. pp. 239–245. [In Russ].

17. Nikiforova L.V., Yakovlev B.V. Theoretical research of process of a jiggling at mineral processing. 2D system of the strong correlated electrons: From fundamental research to practical applications. Abstracts of the All-Russian Conference with International Participation (Yakutsk, 18–23 June 2018.). editorial team Yu. M. Grigoriev [and etc.]. Yakutsk: Publishing House NEFU, 2018. 107 p. [In Russ].

18. Karlina Antonina Study of the gravity separation mechanism and process mathematical model improvement. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2015. no. 2 (97). pp. 168–173. [In Russ].

19. Morozov Yu. P. Analysis of the gravitational separation of minerals in constrained conditions of movement. *Izvestiya vuzov. Mining magazine*. no. 4, 2011 pp. 93–98. [In Russ].

20. Merinov N. F. Patterns of movement of mineral grains in a gravitational field. *Enrichment of ores*, 2006, no. 4. pp. 24–29. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Пеньков Павел Михайлович*¹ — инженер-исследователь, e-mail: Pavel.Penkov@m.ursmu.ru; ORCID ID: 0000-0001-9531-1896;

*Морозов Юрий Петрович*¹ — докт. техн. наук, профессор, e-mail: tails2002@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-0554-5176;

*Прокопьев Сергей Амперович*² — канд. тех. наук, генеральный директор;

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30;

² ООО Научно-производственная компания «Спирит», Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128 к. 2.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Penkov P.M.*¹, research engineer, Pavel.Penkov@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9531-1896;

*Morozov Yu. P.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, ORCID ID: 0000-0003-0554-5176

*Prokopyev S. A.*², Cand. Sci. (Eng.), General Director,

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144;

² LLC Research and Production Company “Spirit”, Russia, 66403, Irkutsk, st. Lermontov, 128 k. 2.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 14.09.2022; принята к печати 10.10.2022.

Received by the editors 16.06.2022; received after the review 14.09.2022; accepted for printing 10.10.2022.