

S-МОДЕЛЬ ОСВЕТЛЕНИЯ РУДЫ В СГУСТИТЕЛЕ

Р. Е. Леонов¹, Д. В. Сосновская¹

¹Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия, lprep2011@mail.ru

Аннотация: Разработана математическая модель и структура блоков, имитирующих технологический процесс осаждения пульпы в сгустителе. Модель основана на теоретическом описании процесса осаждения, на известных законах движения мелкодисперсного зерна руды шаровой формы в нестесненных условиях, без чего невозможно проектирование и настройка систем автоматического регулирования процесса. При рассмотрении геометрических размеров сгустителя и фракционного состава пульпы появляется возможность исследования сгустителя как составной части системы автоматического регулирования. В основе разработки математической модели использован закон Стокса, определяющий силу сопротивления F , испытываемую твёрдым шаром при его медленном поступательном движении в неограниченной вязкой жидкости. Это позволило получить дифференциальное уравнение процесса с помощью изображений Лапласа, переходную кривую и аппроксимировать ее с высокой точностью уравнением инерционного звена автоматического управления. На основе теоретического описания технологического процесса сгущения получено уравнение изменения пути частицы руды во времени. Интегрирование уравнения изменения пути позволило аппроксимировать математическую модель осаждения с достаточной точностью инерционным звеном первого порядка, что является базой для дальнейшей разработки системы автоматического управления процессом осаждения.

Ключевые слова: объект управления, S-модель, осаждение, сгущение, число Рейнольдса, движение единичного зерна, изображение Лапласа, фракция.

Для цитирования: Леонов Р. Е., Сосновская Д. В. S-модель осветления руды в сгустителе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-1. – С. 190–198. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_190.

S-model of ore purification in a thickener

R. E. Leonov¹, D. V. Sosnovskaya¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: The article is devoted to the development of a mathematical model and the structure of the blocks simulating the technological process of pulp sedimentation in a thickener. The obtained model results from a theoretical description of the sedimentation process based on the known laws of free motion of spheroid fine ore grains, which is crucial for designing and adjusting automatic process control systems. Considering the geometric dimensions of the thickener and the fractional composition of the pulp, it becomes possible to study the thickener as an integral part of the automatic control system. The developed mathematical model makes use of the Stokes's law which determines the resistance force F acting on a solid sphere when it slowly moves through unlimited viscous fluid. This makes it possible to obtain the differential

equation of the process using Laplace images, the transition curve accurately approximated by the equation for the aperiodic link of automatic control. A theoretical description of the technological process thickening serves as a basis for obtaining an equation for the time change in a flow path of an ore particle. The integration of the equation for the change in a path results in accurate approximation of the mathematical sedimentation model by a first-order aperiodic link, which is expected to be the basis for the further development of an automatic sedimentation process control system.

Key words: control object, S-model, sedimentation, thickening, Reynolds number, movement of a single grain, Laplace image, fraction.

For citation: Leonov R. E., Sosnovskaya D. V. S-model of ore purification in a thickener. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-1):190–198. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_190.

Введение

Сгущение является одним из часто используемых технологических процессов обогащительных фабрик. За основу взято движение зерна твердого вещества в радиальном сгустителе. Ввиду этого модель представляет как теоретический, так и практический интерес.

Рассмотрению движения твердой частицы (далее — руды) [1] в жидкости (далее — пульпе) уделялось и до сих пор уделяется большое внимание. В [2] приведен обширный список литературных источников, и рассматривается этот процесс как основа понимания и расчета технологического оборудования обогащительных фабрик. В современных условиях, когда появилась возможность создать визуальные модели средствами мощных аналитических программ, возможно не только рассчитать различные особенности этого движения, но и выбрать параметры технологического оборудования с минимальными затратами и высокой эффективностью.

Методика проведения исследования

Модель получена в виде блок-схемы в программной среде MATLAB, Simulink (S-модель), которая позволяет контролировать время отсадки при изменении множества параметров:

плотности руды, плотности и вязкости пульпы [3], высоты сгустителя и др.

Модель основана на известных законах движения зерна руды шаровой формы в нестесненных условиях [4–5]. На практике эти условия редко выполняются. В связи с этим часто для определения производительности сгустителя и изучения процесса осаждения пульпы [6] вводят поправки в теоретические формулы. Само количество таких поправок и эмпирических формул, описывающих процесс осаждения, показывает, что окончательно вопрос до сих пор не решен.

Использование S-модели позволяет исследовать процесс осаждения, задавая различные начальные условия и не решая достаточно сложных математических нелинейных уравнений.

Для получения S-модели применен аппарат передаточных функций. Это позволяет использовать результаты моделирования при проектировании систем [7–8] автоматического регулирования процесса осаждения в сгустителях. Информация о геометрических размерах сгустителя и фракционном составе пульпы дает возможность исследования сгустителя как составной части системы автоматического регулирования [9].

Исследования показывают, что закономерности процесса осаждения зависят от числа Рейнольдса, которое

в свою очередь определяет сопротивление пульпы процессу осаждения. Закономерности отсадки принципиально разнятся в зависимости от значения числа Рейнольдса. В литературе при определённых допущениях получена математическая модель отсадки, основанная на рассмотрении движения единичного зерна руды в пульпе. При отсутствии сопутствующих зерен зерно считается определенной крупности, шарообразной формы [10]. Все отклонения от этих допущений (стесненность движения, нешарообразности и пр.) учитываются эмпирическими коэффициентами.

Полученная в данной работе модель также основана на движении единичного зерна. Частично это оправдано, учитывая несоизмеримость диаметра технологического оборудования и размеров зерен руды. Кроме того, модель предусматривает большую гибкость в задании начальных условий, и при необходимости легко может быть дополнена с учетом более сложного математического описания движения зерна при отсадке.

Выходной величиной модели является время осаждения зерна. Изменяя начально задаваемые параметры, можно оценить время осаждения каждой из фракций, а следовательно, и общую эффективность процесса [11]. Оценка времени осаждения самых мелких фракций, естественно, лимитирует общее время процесса [12–14].

В работе рассмотрена S-модель осаждения мелких классов, для которых сопротивление среды определяется законом Стокса.

Движение зерна руды в пульпе соответствует рис. 1.

С учетом допущения сила сопротивления составит

$$R_c = 6\pi\mu r v, \quad (1)$$

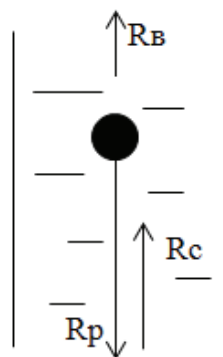


Рис. 1. Движение зерна руды при отсадке: R_p – вес зерна, R_B – выталкивающая сила, R_c – сила сопротивления движению
Fig. 1. Movement of an ore grain in the process of jigging: R_p – grain weight, R_B – buoyancy force, R_c – motion resistance force

где r – радиус частицы, м; μ – динамическая вязкость пульпы, Па·с; v – скорость частицы, м/с.

Подставим известные соотношения:

$$R_p = m_p \cdot g, \quad R_B = m_B \cdot g,$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; m_p и m_B – масса руды и пульпы соответственно, кг.

Используя второй закон Ньютона, получаем

$$m_p \cdot a = R_p - R_B - R_c, \quad (2)$$

где a – ускорение частицы руды, м/с².

Учитывая, что ускорение, приобретаемое частицей руды [15], является производной от ее скорости, которая в свою очередь является производной пройденного частицей пути, получим основное уравнение относительно пути, пройденного частицей при отсадке. Примем

$$B = \frac{9 \cdot \mu}{2 \cdot R_p \cdot r^2}, \quad A = \frac{(R_p - R_B) \cdot g}{R_p}, \quad (3)$$

получим

$$S'' + B \cdot S' = A, \quad (4)$$

где S – путь, пройденный зерном руды.

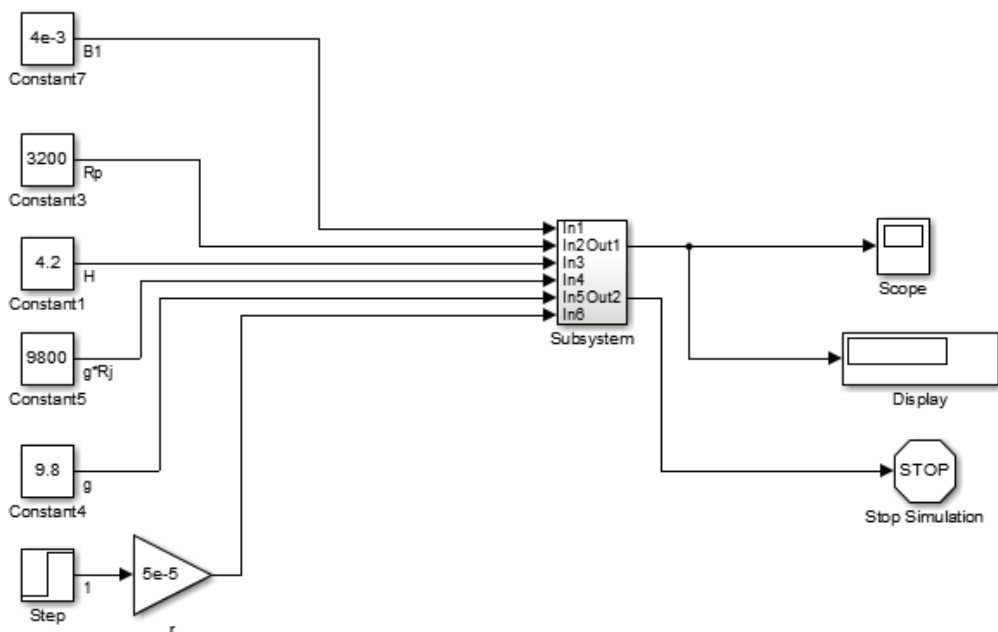


Рис. 2. Подсистема модели
Fig. 2. Model subsystem

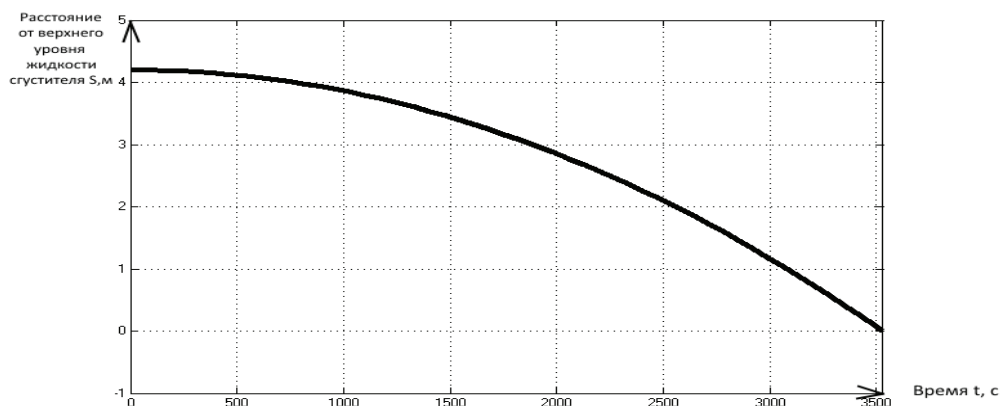


Рис. 3. Переходная характеристика процесса осаждения
Fig. 3. Transient characteristic of the sedimentation process

Учитывая дальнейшее использование модели, в том числе и при исследовании систем автоматического управления, перейдем в (4) к изображениям Лапласа функции времени $S(t)$. Обозначая изображение пройденного частицей руды пути $S(p)$ и учитывая нулевые начальные условия, получим

$$p^2 \cdot S(p) + B \cdot p \cdot S(p) = \frac{A}{p}. \quad (5)$$

$$\text{Отсюда } S(p) = \frac{A}{p \cdot (p^2 + p \cdot B)}. \quad (6)$$

Разлагая правую часть на элементарные дроби и используя обратное преоб-

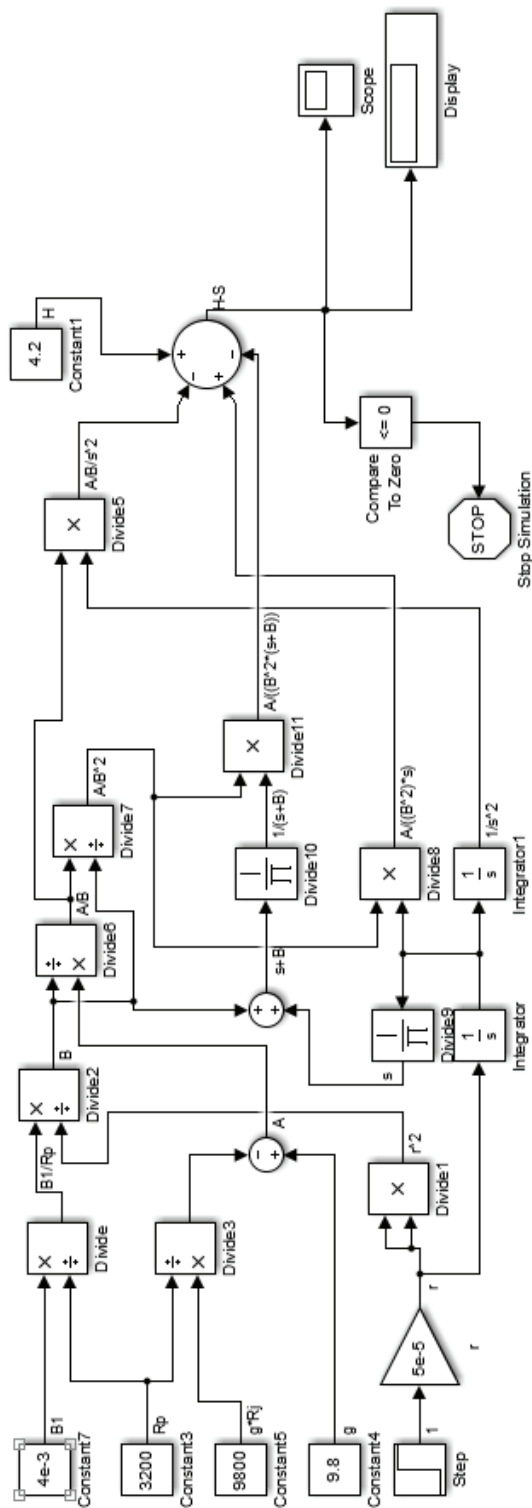


Рис. 4. Модель полученной системы
Fig. 4. Model of the obtained system

разование Лапласа, находим изменение пути частицы руды во времени:

$$S = \frac{A}{B} \cdot t - \frac{A}{B^2} + \frac{A}{B^2} \cdot e^{-Bt}. \quad (7)$$

Чтобы найти время осаждения, следует приравнять правую часть к высоте сгустителя. Уравнение (7) является основой получения S-модели.

На рис. 2 приведена модель, в которой основная вычислительная часть «упакована» в подсистему. За пределы подсистемы выведены начальные значения, которые можно задавать при исследовании различных режимов работы модели, и конечные результаты моделирования. В модели предусмотрен автоматический останов, когда пройденный зерном руды путь достигает нуля (отсчет пути идет от уровня высоты сгустителя). Продвижение частицы во времени можно видеть на рис. 3. На рис. 3 точка пересечения линии «нуль» (линия дна сгустителя) вычислена с точностью порядка 10^{-14} . Блоки вводимых начальных условий [16–20] представлены в левой части. Один из основных блоков — это радиус зерна (r).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dmitriev A. N., Vitkina G. Y., Fishman A. Y., Sapozhnikova T. V., Shunyaev K. Y., Petukhov R. V., Kornilkov S. V., Pelevin A. E. The characteristic of ores and concentrates of the open society «EVRAZ KGOK» // *Advanced Materials Research*. 2013. Т. 834–836. С. 364–369.
2. Nagaraj D. R. *Minerals Recovery and Processing*. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., — 2005. — pp. 2–10. DOI: 10.1002/0471238961.1309140514010701.
3. Шариков Ю. В., Николаев А. Н., Кравчук А. А. Влияние стабилизации конечной плотности сгущения пульпы на качество концентрата // *Металлург*. — 2016. — №2. — С.85–88.
4. Матвеев И. А., Матвеев А. И., Григорьев Ю. М., Еремеева Н. Г. Экспериментальное и теоретическое изучение движения частиц в водном потоке // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2018. — № 11. — С. 171–177. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-171-177.
5. Divyamaan W., Prashant G., VedPrakash M. Chapter 7 Liquid–Solid Processes. In: *Multiphase Flows for Process Industries: Fundamentals and Applications, Volume 2*. — 2022. — p. 359–475 DOI: 10.1002/9783527812066.

На рис. 4 приведена полная модель S-системы с изображением внутренней части подсистемы.

Дальнейшее совершенствование модели возможно в направлении рассмотрения более сложного закона изменения сопротивления среды, в частности, использования формулы сопротивления Ньютона-Риттингера и создания модели с учетом фракционного состава пульпы, что позволит перейти к созданию системы автоматического регулирования производительности сгустителя.

Выводы

На основании теоретических работ по движению мелких зерен руды в сгустителе в работе получена визуальная модель в среде MATLAB, Simulink, позволяющая исследовать влияние различных параметров процесса осаждения рудных зерен. Модель может быть использована как в теоретических работах исследований по данному технологическому процессу, так и в практике создания и настройки систем автоматического регулирования процесса осаждения в радиальных сгустителях.

6. *Леонов Р. Е., Сосновская Д. В.* Осаждение частиц руды в пульпе: междунар. науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 11 апр. 2022 г.). — Екатеринбург: УГГУ. — 2022. — С.445–446.

7. *Болотаева И. И.* Исследование и разработка автоматизированной системы управления процессом сгущения пульп в металлургии: автореф. дис. канд. техн. наук. СКГМИ(ГТУ). — 2006. — 23 с.

8. *Письменский А. В.* Метод автоматического управления процессами сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации//Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2010. — №6. — С.38–43.

9. *Леонов Р. Е.* К обоснованию моделей некоторых аппаратов обогатительных фабрик при создании систем автоматического регулирования//Известия вузов. Горный журнал. — 2019. — №1. — С.119–126. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-1-119-126.

10. *Kozin, V. Z., Morozov, Yu. P., Komlev, A. S., Volkov, P. S., Bekchurina, E. A.* Systems of sampling and process control of mineral dressing // IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress. — 2019. — Pp.61–69.

11. *Козин В. З., Водовозов К. А.* Факторы, вызывающие положительный дисбаланс продукции на ГОКах // Обогащение Руд. — 2013. — №2. — С. 27–31. DOI: 10.17580/op.2013.02.05.

12. *Козин В. З., Морозов Ю. П., Комлев А. С., Фалькович Е. С.* Оборудование и технология для отбора и подготовки проб на перерабатывающих предприятиях // Горный журнал. — 2015. — №8. — С. 76–81. DOI: 10.17580/гж.2015.08.16.

13. *Козин В. З., Комлев А. С., Водовозов К. А.* Погрешности определения выхода и извлечения в технологических балансах обогатительных фабрик // Обогащение Руд. — 2018. — №3. — С. 44–50. DOI: 10.17580/op.2018.03.08.

14. *Козин В. З., Водовозов К. А.* Скрытые излишки и потери ценных компонентов на горно-обогатительных предприятиях // Обогащение Руд. — 2013. — №1. — С.37–39.

15. *Ковкова Т. М.* Совершенствование процесса сгущения хвостовой пульпы//Обогащение Руд. — 2006. — №3. — С.54–55.

16. *Гудошников А. В.* Применение интеллектуального блока для повышения эффективности процесса сгущения//Вестник современных исследований. — 2017. — №14. — С.191–193.

17. *Фомичева С. Г., Галков А. И.* Имитационная модель как средство решения проблемы ухудшения показателей процесса сгущения пульповых материалов//Культура. Наука. Производство. — 2019. — №3. — С.64–71.

18. *Ozgun Akkoyn, Nicola Careddu.* Mine simulation for educational purposes: A case study // Computer Applications in Engineering Education. 2015. No. 23(2). P. 286–293.

19. *Леонов Р. Е., Патраков С. С.* Математическая модель агитатора для серноокислотного выщелачивания цинка как объекта управления // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11–1. — С. 366–373. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_366.

20. *Леонов Р. Е.* Объекты управления с переменным транспортным запаздыванием // Известия вузов. Горный журнал. 2021. No 1. С. 122–130. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-122-130. **ПИАБ**

REFERENCES

1. *Dmitriev A. N., Vitkina G. Y., Fishman A. Y., Sapozhnikova T. V., Shunyaev K. Y., Petukhov R. V., Kornilov S. V., Pelevin A. E.* The characteristic of ores and concentrates of the open society «EVRAZ KGOK». Advanced Materials Research. 2013. Vol. 834–836. pp. 364–369.

2. *Nagaraj D. R.* Minerals Recovery and Processing. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005. pp. 2–10. DOI: 10.1002/0471238961.1309140514010701.

3. Sharikov Yu. V., Nikolaev A. N., Kravchuk A. A. Influence of stabilization of the final density of pulp thickening on the quality of the concentrate//Metallurg. 2016. no. 2. pp. 85–88. [In Russ].
4. Matveev I. A., Matveev A. I., Grigoriev Yu. M., Ereemeeva N. G. Experimental and theoretical study of the movement of particles in a water stream. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018. no. 11. pp. 171–177. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-171-177. [In Russ].
5. Divyamaan W., Prashant G., VedPrakash M. Chapter 7 Liquid–Solid Processes. In: *Multiphase Flows for Process Industries: Fundamentals and Applications, Volume 2.* 2022. pp. 359–475. DOI: 10.1002/9783527812066.
6. Leonov R. E., Sosnovskaya D. V. Sedimentation of ore particles in the pulp: Intern. scientific-practical. conf. (Ekaterinburg, April 11, 2022). Yekaterinburg: URSMU. 2022. pp. 445–446. [In Russ].
7. Bolotayeva II Research and development of an automated control system for the process of pulp thickening in metallurgy: author. dis. cand. tech. Sciences. SKGMI (GTU). 2006. 23 p. [In Russ].
8. Pismensky A. V. Method of automatic control of the processes of thickening of sludge waters and clarification of flotation wastes//East European Journal of Advanced Technologies. 2010. no. 6. pp. 38–43. [In Russ].
9. Leonov R. E. On the justification of models of some apparatuses of concentrating plants when creating automatic control systems. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal.* 2019. no. 1. pp. 119–126. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-1-119-126. [In Russ].
10. Kozin, V. Z., Morozov, Yu. P., Komlev, A. S., Volkov, P. S., Bekchurina, E. A. Systems of sampling and process control of mineral dressing. IMPC 2018 29th International Mineral Processing Congress. 2019. pp. 61–69.
11. Kozin, V. Z., Vodovozov, K. A. Factors causing positive product imbalance at ore-dressing plants//Obogashchenie Rud. 2013. no. 2. pp. 27–31. DOI: 10.17580/or.2013.02.05 [In Russ].
12. Kozin, V. Z., Morozov, Yu.P., Komlev, A. S., Falkovich, E. S. Equipment and technology for sample taking and preparation at processing plants. *Gornyi Zhurnal.* 2015. no. 8. pp. 76–81. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.16 [In Russ].
13. Kozin, V. Z., Komlev, A. S., Vodovozov, K. A. Errors in determining yields and recoveries in process balances of concentrating plants. *Obogashchenie Rud.* 2018. no. 3. pp. 44–50. DOI: 10.17580/or.2018.03.08 [In Russ].
14. Kozin, V. Z., Vodovozov, K. A. Hidden excesses and losses of valuable components at ore-dressing facilities. *Obogashchenie Rud.* 2013. No.1. pp. 37–39. [In Russ].
15. Kovkova T. M. Improving the process of tailing pulp thickening//Enrichment of ore. 2006. no. 3. pp. 54–55. [In Russ].
16. Gudoshnikov A. V. The use of an intelligent unit to improve the efficiency of the thickening process. *Bulletin of modern research.* 2017. no. 14. pp. 191–193. [In Russ].
17. Fomichea S. G., Galkov A. I. Simulation model as a means of solving the problem of deterioration of indicators of the process of thickening of pulp materials//CULTURE. SCIENCE. PRODUCTION. 2019. no. 3. pp. 64–71. [In Russ].
18. Ozgur Akkoyun, Nicola Careddu. Mine simulation for educational purposes: A case study. *Computer Applications in Engineering Education.* 2015. no. 23(2). pp. 286–293.
19. Leonov R. E., Patrakov S. S. Mathematical model of agitator for sulfuric-acid zinc leaching as a control object. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11–1):366–373. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_366.
20. Leonov R. E. Control objects with variable transport delay. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal.* 2021. no. 1, pp. 122–130. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-122-130. **MIAB**

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонов Рафаил Ефимович — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры Автоматики и компьютерных технологий,
ID ORCID: 0000-0002-2531-8336,
lprep2011@mail.ru;

Сосновская Дарья Валерьевна — студент магистратуры по специальности «Автоматизация и управление технологическими процессами опасных производственных объектов», кафедра автоматики и компьютерных технологий,
ID ORCID: 0000-0002-6707-080X,

daria.sosnovskaya.1999@gmail.com,

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет» (ФГБОУ «УГГУ»), Россия, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

Для контактов: *Леонов Рафаил Ефимович*, lprep2011@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Leonov R. E.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Automation and Computer – Integrated Technologies,
ORCID ID: 0000-0002-2531-8336,
lprep2011@mail.ru;

Sosnovskaya D. V., Master's Degree Student majoring in Automation and Control of Technological Processes at Hazardous Production Facilities, Department of Automation and Computer – Integrated Technologies,

ORCID ID: 0000-0002-6707-080X,

daria.sosnovskaya.1999@gmail.com;

¹ Federal State Budgetary Institution of Higher Education «Ural State Mining University» (FSBI HO «USMU»), 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144.

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.

