

УДК 681.518 © С.Г. Пачкин✉, П.П. Иванов, Л.А. Иванова,
Е.С. Михайлова, А.Г. Семенов, 2025

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: sergon777@inbox.ru

UDC 681.518 © S.G. Pachkin✉, P.P. Ivanov, L.A. Ivanova,
E.S. Mikhaylova, A.G. Semenov, 2025

Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: sergon777@inbox.ru

Автоматизация процесса непрерывной флотационной очистки карьерных сточных вод*

Automation of the continuous flotation treatment process for open-pit drain water

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-7-87-91>

Одним из наиболее распространенных способов реагентной очистки карьерных сточных вод является флотация. В результате химической реакции происходит переход ионов растворенного загрязнителя в связанное, нерастворимое состояние, что создает условия для его механического отделения от очищаемой воды. Часто для этой операции используют горизонтальные многокамерные флотаторы, позволяющие в условиях напорной флотации осуществить выделение как всплывающих, так и осаждающихся агломератов. Качество проведения флотационной очистки зависит от правильно подобранной концентрации химического реагента и продолжительности его взаимодействия с загрязнителями. Система автоматического регулирования процесса реагентной напорной флотации характеризуется наличием связанных параметров, регулирование которых с помощью независимых систем управления ведет к формированию колебательности переходного процесса, что в свою очередь снижает эффективность очистки. Разработанная система автоматического управления позволяет учесть взаимное влияние регулируемых параметров за счет внесения в схему дополнительных компенсаторов, обеспечивающих формирование предваряющих сигналов управления для связанных контуров.

Ключевые слова: карьерные сточные воды, система автоматического управления, флотационная очистка, флотатор, связанное регулирование, компенсатор.

Для цитирования: Автоматизация процесса непрерывной флотационной очистки карьерных сточных вод / С.Г. Пачкин, П.П. Иванов, Л.А. Иванова и др. // Уголь. 2025;(7):87-91. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-87-91.

Abstract

One of the most commonly used methods of reactant treatment of open-pit drain water is flotation. As the result of a chemical reaction, ions of the dissolved pollutants are changed into a bound insoluble state, which creates conditions for their mechanical separation from the treated water. Horizontal multi-chamber flotation machines are often used for this operation, allowing both floating and settling agglomerates to be separated under the pressure flotation conditions. The efficiency of flotation treatment depends on the correct concentration of the chemical reactant and the amount of time it interacts with the pollutants. The automatic control system for the reactant pressure flotation process is

ПАЧКИН С.Г.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры
Мехатроники и автоматизации
технологических систем,
ФГБОУ ВО «Кемеровский
государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: sergon777@inbox.ru

ИВАНОВ П.П.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры
Мехатроники и автоматизации
технологических систем,
ФГБОУ ВО «Кемеровский
государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: ipp7@yandex.ru

* Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № соглашения 075-15-2022-1201 от 30.09.2022.

ИВАНОВА Л.А.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры
«Техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «Кемеровский
государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

МИХАЙЛОВА Е.С.

Канд. хим. наук, начальник управления
по реализации КНТП,
ФГБОУ ВО «Кемеровский
государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

СЕМЕНОВ А.Г.

Доктор техн. наук, профессор кафедры
Теории и методологии
преподавания естественнонаучных
и математических дисциплин,
ФГБОУ ВО «Кемеровский
государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: agsem55@yandex.ru

characterized by the presence of interrelated parameters, the control of which by means of independent control systems causes fluctuations in the transition process, which in turn reduces the efficiency of treatment. The developed automatic control system allows taking into account the mutual influence of the controlled parameters by introducing additional compensators into the scheme, which ensure the formation of preceding control signals for the related circuits.

Keywords

Open-pit drain water, automatic control system, flotation treatment, flotation unit, interacting control, compensator.

Acknowledgements

The research was carried out as part of the 'Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life' Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No. 1144p of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022, with financial support by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation, Agreement No. 075-15-2022-1201 as of September 30, 2022.

For citation

Pachkin S.G., Ivanov P.P., Ivanova L.A., Mikhaylova E.S., Semenov A.G. Automation of the continuous flotation treatment process for open-pit drain water. *Ugol'*. 2025;(7):87-91. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-87-91.

ВВЕДЕНИЕ

Реагентная (химическая) очистка является обязательным этапом практически всех технологических схем очистки промышленных сточных вод. Этот метод применяют в тех случаях, когда выделение загрязнителей возможно только в результате проведения химической реакции между реагентом и загрязнителем, находящимся в растворенном состоянии. Результатом химической реакции являются перевод растворенных загрязнителей в нерастворимые соединения, а также формирование связанных агломератов (флокул), пригодных для последующего механического отделения [1, 2]. При проведении реагентной обработки применяют специальные вещества – коагулянты (бентонит, растворимые соли алюминия, железа, магния, известковый шлам, аммиачная вода и др.) и флокулянты (синтетические и природные полимеры, неорганические вещества, такие как: активная кремниевая кислота, полиакриламид и др.).

Для отделения образовавшихся агломератов от воды наибольшее распространение получили методы осаждения, флотации и фильтрации. При этом данные способы очистки могут использоваться как при реализации реагентной очистки, так и самостоятельно. Однако их эффективность при реагентном способе очистки значительно выше. Процессы фильтрации и центробежного осаждения характеризуются значительно большими эксплуатационными расходами на единицу объема очищаемой воды, что снижает их применимость при очистке больших объемов карьерных сточных вод. В то же время процессы флотации и гравитационного осаждения хорошо изучены и постоянно используются как в горнодобывающей промышленности, так и для очистки воды от различных примесей [3].

При использовании метода реагентной обработки сточные воды угольных карьеров очищаются от нефтепродуктов, соединений марганца, железа, серы и др. Аппаратурное оформление этой стадии осуществляется на базе универсальных флотационных установок (флотокомбайнов), реализующих методы гравитационного осаждения и напорной флотации [4]. Подаваемая в флотокомбайн сточная вода насыщается воздухом или углекислым газом под избыточным давлением. При попадании воды в аппарат давление резко снижается до атмосферного, в результате чего образуются микропузырьки газа, поднимающиеся вверх и захватывающие на своей

поверхности частицы загрязнителей. При поддержании необходимого размера пузырьков и их количества в объеме обрабатываемой воды на поверхности жидкости будет образовываться пена, состоящая из частиц загрязнителей, которая убирается механическим способом. В то же время частицы, имеющие плотность большую, чем плотность воды, осаждаются в приемных воронках каждой секции, откуда удаляются в виде шлама.

Таким образом, очистка сточных вод реагентным способом включает несколько стадий: приготовление и дозирование реагентов, смешивание их с водой, хлопьеобразование, отделение нерастворимых примесей от воды.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ

В общем виде процесс напорной реагентной флотации сточных вод угольных карьеров как объекта автоматизации можно представить в виде информационной схемы, приведенной на *рис. 1*, где сверху показаны основные возмущающие воздействия, влияющие на ход процесса флотации и его качественные показатели, а слева – основные управляющие переменные, с помощью которых можно добиться достижения требуемого качества очистки сточных вод. Выходной переменной является концентрация ведущего загрязнителя в воде, выходящей из установки.

Несмотря на то, что реагентная напорная флотация широко используется в системах очистки, при реализации систем управления такими процессами в основном используются локальные автоматические системы регулирования и контроля [5]. Но в условиях нестационарности объема очищаемой воды и концентрации загрязнителей локальные системы могут не справляться с возникающими возмущениями, так как процесс напорной флотации характеризуется высокой интенсивностью и значительной чувствительностью к возмущениям.

Проанализировав различные способы проведения реагентной напорной флотации, было определено, что наиболее подходящей для очистки сточных вод угольных карьеров является многокамерная горизонтальная установка, реализующая рециркуляционную флотацию [6]. Укрупненная функциональная схема автоматизации процесса реагентной напорной флотации показана на *рис. 2*. Основным регулируемым параметром установки является концентрация загрязняющих веществ в очищенной воде *AE1-21*, для достижения которой необходимо стабилизировать несколько дополнительных параметров, таких как высота пены, образуемой на поверхности воды в первой камере (регулятор *ZC1-32*), и уровень воды в выходной секции 4.5, откуда происходит отвод очищенной воды (регулятор *LC1-4*).

Качество очистки при рециркуляционной флотации достигается за счет того, что часть воды из выходной секции с помощью насоса *M2* возвращается в первые три камеры флотационной установки 4.1, 4.2 и 4.3, поэтому для стабилизации нагрузки на флотационную установку необходимо реализовывать еще один контур регулирования *FC1-54*, который для стабилизации суммарного расхода очищенной воды *FY1-53* изменяет расход исходной воды, подаваемой в первую секцию 4.1 с помощью клапана *Kф1*. Распределение циркуляционного потока между секциями 4.1, 4.2 и 4.3 задается с помощью местных ручных кла-

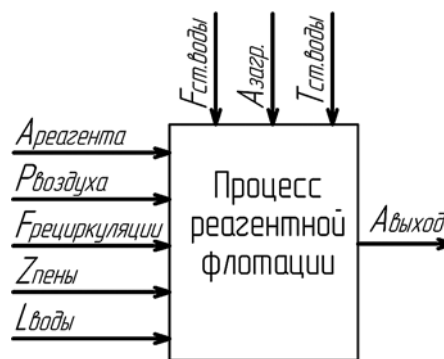


Рис. 1. Информационная структурная схема процесса реагентной напорной флотации сточных вод угольных карьеров: Возмущающие воздействия: $F_{ст. воды}$ – объем подаваемой сточной воды; $T_{ст. воды}$ – температура подаваемой сточной воды; $A_{загр.}$ – концентрация загрязнителей в подаваемой сточной воде; Управляющие воздействия: $A_{реагента}$ – концентрация реагента в флотокомбайне; $R_{воздуха}$ – давление воздуха в сатураторе; $F_{циркуляции}$ – расход рециркуляционного потока; $L_{воды}$ – уровень воды; $Z_{пены}$ – высота пены; Выходные переменные: $A_{выход}$ – концентрация ведущего загрязнителя на выходе из установки

Fig. 1. Information structural diagram of the reagent pressure flotation process for coal mine wastewater: disturbing influences

панов *Kp1-1*, *Kp1-2* и *Kp1-3*, которые при необходимости можно оснастить приводами и изменять их положение дистанционно. Таким образом, за счет работы регулятора *FC1-54* только часть сточной воды, подаваемой из смесителя *поз. 2*, может быть очищена на одной флотационной установке такого типа. При этом объем очищаемой воды может постоянно меняться в зависимости от температуры воды и концентрации загрязнителей в ней.

Поэтому в промышленных условиях, когда сточная вода поступает на стадию флотационной очистки после стадии коагуляции с заранее заданным расходом, производительности, одной флотационной установки может быть недостаточно для очистки всего объема подаваемой сточной воды и для формирования неразрывного потока очищаемых сточных вод. Поэтому предлагается использовать несколько параллельно работающих флотационных установок, перераспределяя общий поток очищаемой сточной воды с помощью клапанов *Kф1-KфN* таким образом, чтобы добиться минимизации затрат на обслуживание всех флотационных установок, не снижая качества очищенной воды ниже нормативных показателей. При этом дополнительно можно предусмотреть возможность временного вывода из работы одной или нескольких флотационных установок для их технического обслуживания, особенно в сезоны, когда количество очищаемых сточных вод минимально [7]. Максимальное количество флотационных установок *N* выбирается для каждого угольного карьера индивидуально, в зависимости от среднего объема на-капливаемых вод и от степени их загрязнения.

Стадию насыщения сточной воды реагентами предлагается сделать общей для всех флотационных установок и оснастить системой регулирования соотношения расходов подаваемой воды и реагента из установки подготовки

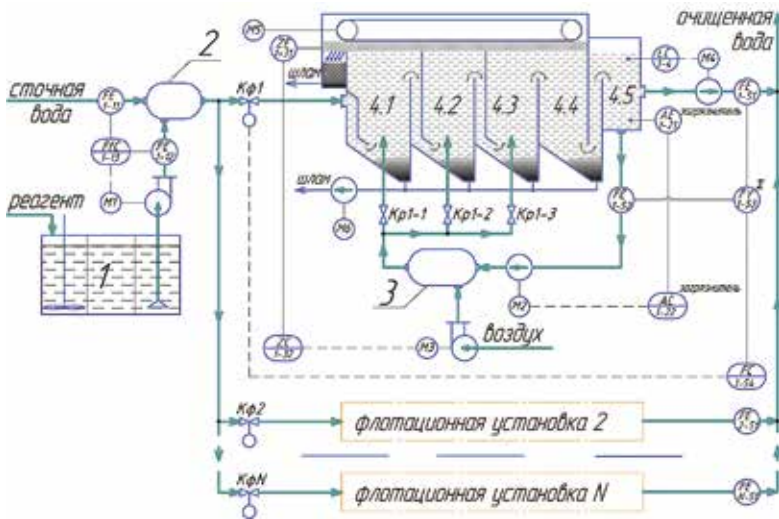


Рис. 2. Укрупненная функциональная схема автоматизации процесса реагентной напорной флотации: 1 – установка подготовки раствора реагента; 2 – смеситель; 3 – сатуратор; 4 – многокамерный горизонтальный флотатор

Fig. 2. A simplified functional diagram of the process automation for the reactant pressure flotation: 1 – preparation unit for the reactant solution 2 – mixer; 3 – saturation tank; 4 – multi-chamber horizontal flotation cell

раствора реагента поз.1 (регулятор FfC1-13). Задающее воздействие доли раствора реагента предполагается вводить оператором вручную в зависимости от результатов лабораторного анализа степени загрязнения подаваемой на очистку сточной воды. Это значение также может быть оперативно скорректировано на основе анализа результатов работы использующихся флотационных установок.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании анализа информационной модели процесса реагентной очистки, реализованной в многокамерной горизонтальной флотационной установке, была разработана структурная схема системы автоматического управления, приведенная на рис. 3.

Схема предполагает, что для повышения степени использования реагента целесообразно организовать схему частичной рециркуляции, предполагающей возврат части очищенной воды в реакционное пространство аппарата. Таким образом, величиной рециркуляционного потока FE1-52 обеспечивается итоговая корректировка качества очищенной воды (канал W22). Для этого с помощью регулятора AC1-22 происходит изменение скорости вращения двигателя насоса M2, установленного на трубопроводе рециркуляционного потока в первые три камеры флотационной установки 4.1, 4.2 и 4.3.

Вместе с тем выделенные ранее возмущающие воздействия оказывают влияние не только на качество очистки (датчик AE1-21), но и на процесс образования пены на поверхности зеркала флотационной установки. При этом скорость формирования пены и ее качественные показатели (плотность, дисперсность и др.) являются индикаторами протекания процесса реагентной флотации (канал W23). Косвенным показателем качества пены является ее высота на поверхности воды в первой секции, достовер-

ные измерения которой можно выполнить емкостным уровнемером ZE1-31 [8, 9]. В то же время на высоту пены оказывает влияние давление воздуха в рециркуляционном потоке, поэтому поддержание высоты пены ZE1-31 на заданном уровне производится с помощью изменения частоты вращения двигателя компрессора M2 за счет регулятора ZC1-32, который поддерживает давление воздуха, подаваемого в сатуратор поз.3 (канал W31).

При этом стоит отметить, что расход рециркуляционного потока FE1-52 оказывает непосредственное влияние на процесс пенообразования (канал W32), что приводит к появлению перекрестной связи контуров регулирования «расход рециркуляционного потока» – «высота пены», которую нужно учитывать с помощью дополнительного компенсатора (W1комп), параметры которого определяются из принципа автономности высоты пены от расхода рециркуляционного потока.

В то же время расход рециркуляционного потока является основным возмущением такого параметра, как уровень воды L1-4 в выходной камере 4.5 флотационной установки (канал W43). Поддержание заданного уровня производится регулятором LC1-4, который, изменяя частоту вращения насоса M4, задает расход очищенной воды FE1-52, подаваемой из камеры 4.5 в общий отводящий трубопровод участка флотационной очистки (канал W42). Изменение расхода очищенной воды FE1-52, подаваемой из камеры 4.5, приводит к дисбалансу нагрузки на флотационную установку, которая стабилизиру-

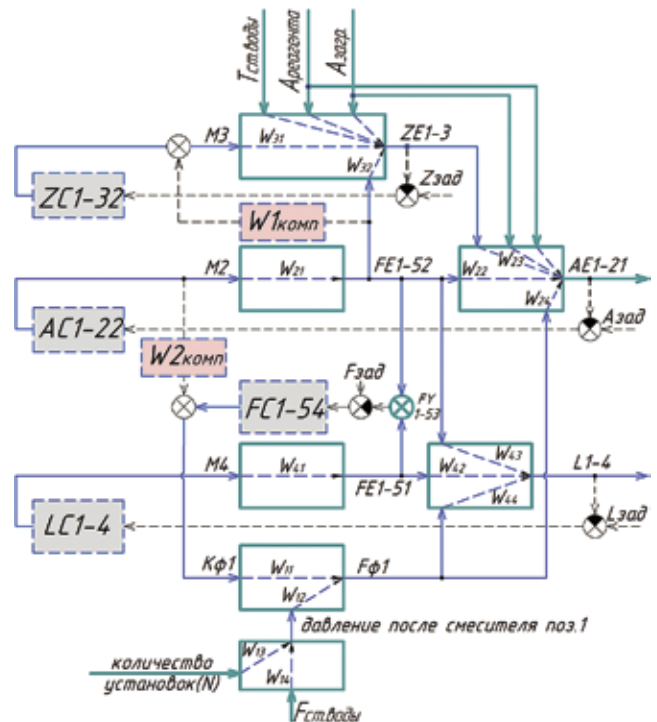


Рис. 3. Структурная схема системы управления флотационной установкой

Fig. 3. A structural diagram of the flotation unit control system

ется регулятором FC1-54, изменяя положение клапана Kф1 (канал W11). Однако главным возмущением данного контура является расход рециркуляционного потока, и для его коррекции предлагается установить компенсатор (W2комн).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование процесса напорной реагентной флотации сточных вод угледобывающих карьеров показало наличие большого числа возмущающих воздействий с широким диапазоном изменения параметров. Нестационарность протекания процессов химического взаимодействия реагентов с загрязнителями и, следовательно, возможные вариации протекания процесса значительно усложняют разработку систем автоматического контроля и регулирования процесса флотации. Существующие системы автоматического регулирования этого процесса, как правило, являются локальными системами, направленными на стабилизацию одного или нескольких параметров. Однако, учитывая связность параметров регулирования (особенно при использовании схемы рециркуляции), добиться высоких показателей качества регулирования сложно. В работе выполнен комплексный анализ процесса, в результате которого разработана структурная схема автоматической системы управления процессом напорной флотации с использованием логических компенсаторов, формирующих сигнал предварения при стабилизации связанных регулируемых параметров.

Список литературы • References

- Лобанов Ф.И., Коробов А.С., Минабаев В.В. Опыт применения флокулянтов «Праестол» для очистки сточных вод и обезвоживания шлама при строительстве скважин и переработке нефти // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 3. С. 43-45.
Lobanov F.I., Korobov A.S., Minibaev V.V. Experience of using Praestol flocculants for wastewater treatment and sludge dewatering in well construction and oil processing. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2009;(3):43-45. (In Russ.).
- Выбор сорбента для элиминации ионов железа из сточных вод / Л.А. Иванова, И.В. Тимошук, А.К. Горелкина и др. // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 2. С. 398-411. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2516.
Ivanova L.A., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Mikhaylova E.S., Golubeva N.S., Neverov E.N., Utrobina T.A. Removing excess iron from sewage and natural waters: selecting optimal sorbent. *Tekhnika i tehnologiya pishchevyh proizvodstv*. 2024;54(2):398-411. (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2516.
- Флотация и ее применение для очистки сточных вод / А.В. Золотов, В.А. Лисовский, И.С. Багреева и др. // Science Time. 2016. № 12(36). С. 266-274.
Zolotov A.V., Lisovsky V.A., Bagreeva I.S., Slepova E.V., Efremenko R.A. Flotation and its application for wastewater treatment. *Science Time*. 2016;(12):266-274. (In Russ.).
- Флотокомбайны – флотационная техника будущего для очистки сточных вод / Б.С. Ксенофонтов, А.С. Козодаев, Р.А. Таранов и др. // Экология и промышленность России. 2013. № 12. С. 4-8.
Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Taranov R.A., Ivanov M.V., Petrova E.V., Vinogradov M.S., Balina A.A. Flotation units: the flotation technology of the future for wastewater treatment. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2013;(12):4-8. (In Russ.).
- Проектирование автоматизированной системы управления технологическим процессом флотации на ПАО «ЦОФ «Березовская» / В.В. Грачев, Л.П. Мышляев, Л.П. Шипунов и др. // Научные разработки и использования минеральных ресурсов. 2019. № 5. С. 291-294.
Grachev V.V., Myshlyayev L.P., Shipunov L.P., Tsiyapkina A.V. Designing an automated control system for the flotation process at the Berezovskaya Central Ore Processing Plant. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov*. 2019;(5):291-294. (In Russ.).
- Вилавский Е.И., Масакбаева С.Р., Баймухамбетова М.Г. Интенсификация процессов флотационной очистки промышленных сточных вод от нефтепродуктов // Universum: технические науки. 2016. № 11(32). С. 8-14.
Vilavskiy E.I., Masakbaeva S.R., Baymukhambetova M.G. Intensification of the process of flotation treatment of industrial wastewater from oil products. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2016;(11):8-14. (In Russ.).
- Ivanov P.P., Pachkin S.G., Ivanova L.A., Mikhailova E.S., Semenov A.G. Wastewater Reuse in Open Pit Coal Mines. *Journal of Mining Science*. 2024;60(3):525-532. DOI: 10.1134/S1062739124030207.
- Патент № 2245741 С1 Российская Федерация, МПК В03В 13/00. Устройство для контроля толщины слоя пены и уровня пульпы во флотомашине: № 2003118945/03: заявл. 26.06.2003: опубл. 10.02.2005 / Г.В. Федин, В.П. Топчаев; заявитель Открытое акционерное общество «СОЮЗЦВЕТМЕТАВТОМАТИКА» (ОАО СЦМА).
- Лавриенко А.А., Федин Г.В. Приборы контроля основных технологических параметров в процессах флотации минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № S1. С. 301-311.
Lavrienko A.A., Fedin G.V. Instruments for control over the main technological parameters in the flotation process of mineral raw materials. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2012;(S1):301-311. (In Russ.).

Authors Information

Pachkin S.G. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: sergon777@inbox.ru

Ivanov P.P. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ipp7@yandex.ru

Ivanova L.A. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

Mikhaylova E.S. – PhD (Chemistry), Head of the Department for Implementation of Integrated Scientific and Technical Program, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

Semenov A.G. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Theory and Methods of Teaching Natural Science and Mathematical Disciplines, Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: agsem55@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.02.2025

Поступила после рецензирования: 17.06.2025

Принята к публикации: 27.06.2025

Paper info

Received February 01, 2025

Reviewed June 17, 2025

Accepted June 27, 2025