

УДК 681.5:628.31 © П.П. Иванов¹, С.Г. Пачкин¹, Р.В. Котляров², Л.А. Иванова¹, Е.С. Михайлова¹, 2024

UDC 681.5:628.31 © P.P. Ivanov¹, S.G. Pachkin¹, R.V. Kotlyarov², L.A. Ivanova¹, E.S. Mikhailova¹, 2024

¹ ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, г. Кемерово, Россия

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation

² ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation

✉ e-mail: ipp7@yandex.ru

✉ e-mail: ipp7@yandex.ru

Автоматизация процесса непрерывной коагулянтной очистки карьерных сточных вод*

Automation of the continuous coagulant treatment process of open pit wastewaters

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-6-101-106>

Одним из способов очистки карьерных сточных вод является коагуляция, которая осуществляется непрерывным вводом коагулянта и образованием суспензии, содержащей агрегаты частиц загрязняющих веществ. Процесс разделения суспензии и удаления дисперсной фазы может быть эффективно выполнен с применением гидроциклона. Стабильность работы гидроциклона и качество процесса разделения обеспечиваются расчетом и выбором конструктивных параметров гидроциклона, а также автоматическим регулированием технологических переменных процесса разделения. Предложена схема автоматизации процесса коагуляции. Рассмотрена система автоматического регулирования (САР) основного технологического параметра – давления в гидроциклоне. Составлена структурная схема САР давления, получены передаточные функции элементов САР. Выполнен расчет параметров автоматического регулятора давления. Анализ результатов моделирования САР с применением инструментов приложения Simulink Matlab показал эффективность применения ПИД-закона регулирования давления в гидроциклоне.

Ключевые слова: коагулянтная очистка, карьерные сточные воды, гидроциклон, система автоматического регулирования давления, передаточная функция, автоматический регулятор, моделирование.

Для цитирования: Автоматизация процесса непрерывной коагулянтной очистки карьерных сточных вод / П.П. Иванов, С.Г. Пачкин, Р.В. Котляров и др. // Уголь.2024;(6):101-106. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-101-106.

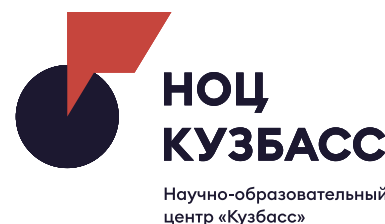
ИВАНОВ П.П.

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

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

* 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.



КОТЛЯРОВ Р.В.

Канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры электропривода
и автоматизации
ФГБОУ ВО «Кузбасский
государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: kotlyarovrv@kuzstu.ru

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

Abstract

One of the methods to treat open-pit wastewater is coagulation, which is carried out by continuous introduction of coagulants to form a suspended mixture that contains aggregates of polluting particles. Suspension separation and removal of the dispersed phase can be effectively performed using a hydrocyclone. Stability of the hydrocyclone operation and the high efficiency of the separation process are ensured by calculation and selection of the hydrocyclone design parameters, as well as by automatic regulation of technological variables of the separation process. An automation scheme of the coagulation process is proposed. An automatic control system (ACS) of the main technological parameter, i.e. pressure in the hydrocyclone – is studied. A structural automatic pressure control system is designed, and the transfer functions of ACS elements are obtained. Parameters for the automatic pressure controller are calculated. Analysis of the ACS modelling results using the Simulink Matlab application tools has shown the efficiency of applying the PID-law for pressure control in the hydrocyclone.

Keywords

Coagulant treatment, open pit wastewater, hydrocyclone, automatic pressure control system, transfer function, automatic controller, simulation.

For citation

Ivanov P.P., Pachkin S.G., Kotlyarov R.V., Ivanova L.A., Mikhailova E.S. Automation of the continuous coagulant treatment process of open pit wastewaters. *Ugol'*. 2024;(6):101-106. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-101-106.

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.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из этапов эффективной очистки карьерных сточных вод угледобывающих предприятий от загрязнений органической и неорганической природы является коагуляция, обеспечивающая образование агрегатов частиц за счет введения коагулянта с последующим разделением суспензии [1, 2]. Для разделения полученной суспензии могут использоваться различные технологические единицы общепромышленного или специального назначения, такие как: отстойники, фильтры, гидроциклоны, центрифуги и др. [3, 4].

Отстаивание суспензий представляет собой свободное осаждение взвешенных частиц под действием силы тяжести [5]. Скорость процесса отстаивания определяется скоростью осаждения частиц, их плотностью, размерами и формой, свойствами дисперсионной среды и пр. Как правило, отстаивание агрегатов частиц занимает от нескольких часов до нескольких десятков часов. При этом отстойники представляют собой громоздкие очистные сооружения, требующие больших капитальных вложений.

С целью интенсификации процесса разделения суспензии используется фильтрование с применением пористых перегородок [3, 6]. Движущей силой процесса фильтрования является разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки. Недостатком процесса фильтрования является необходимость периодической регенерации или замены фильтрующих элементов, что влечет за собой высокие эксплуатационные расходы.

Одним из наиболее эффективных способов интенсификации процесса выделения агрегатов частиц после коагуляции считается замена силы тяжести при гравитационном осаждении центробежными силами, возникающими при вращательном движении потока суспензии. Процесс выделения твердых частиц из водной дисперсионной среды осуществляется в гидроциклонах и центрифугах [5, 7, 8].

В центрифуге центробежная сила создается вращением ее корпуса. Гидроциклон предполагает вращение потока в неподвижном корпусе, поэтому за

счет отсутствия подвижных элементов он конструктивно проще центрифуги, хотя и уступает по качеству разделения суспензии [9].

Поскольку коагулянтная очистка является одним из этапов непрерывного процесса очистки карьерных сточных вод, а далее суспензия подвергается более тонкому разделению, предпочтение отдают гидроциклонам в силу их компактности, простоты конструкции и низкого энергопотребления при высокой скорости протекающих в них процессов [10, 11]. При этом, учитывая низкие затраты на приобретение и эксплуатацию гидроциклонов, можно достаточно легко собрать батарею, тем самым обеспечив необходимую производительность.

Следует отметить, что эффективность коагулянтной очистки определяется, во-первых, свойствами суспензии [12, 13]: видом коллоидных частиц, их концентрацией и степенью дисперсности, наличием электролитов и других примесей и т.д. При этом важнейшим качественным показателем является механическая устойчивость полученных агломератов, которая в большей степени зависит от правильного выбора коагулянта и соблюдения рекомендуемого соотношения с обрабатываемыми сточными водами. Во-вторых, эффективность обеспечивается расчетом и выбором конструктивных параметров гидроциклона и, что важно, поддержанием технологических режимных параметров процесса разделения. Стабилизация значений технологических переменных возможна, главным образом, за счет создания и внедрения современных систем автоматического управления [14, 15, 16].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Система автоматического управления процессом непрерывной коагулянтной очистки карьерных сточных вод включает [17, 18, 19] (рис. 1):

1. Систему автоматического регулирования (стабилизации) давления в гидроциклоне 4 (см. рис. 1, PRC, поз. 1). Неравномерности потерь давления в гидроциклоне обусловлены его конструктивными особенностями и гидродинамикой протекающих в нем процессов. Поддержание давления на заданном уровне позволяет эффективно провести процесс отделения агрегатов частиц и достичь необходимой степени очистки сточных вод.

2. Систему автоматического регулирования соотношения расходов рабочего раствора коагулянта, подаваемого в смеситель 2, и сточных вод, подвергаемых очистке (см. рис. 1, FFRC, поз. 2). Точность дозирования коагулянта определяет размер частиц и механическую устойчивость образованных агрегатов частиц, что способствует снижению нагрузки на технологическое оборудование и оптимизации стоимости очистки сточных вод.

3. Систему автоматической непрерывной подготовки рабочего раствора коагулянта (см. рис. 1, ARC, поз. 3) за счет

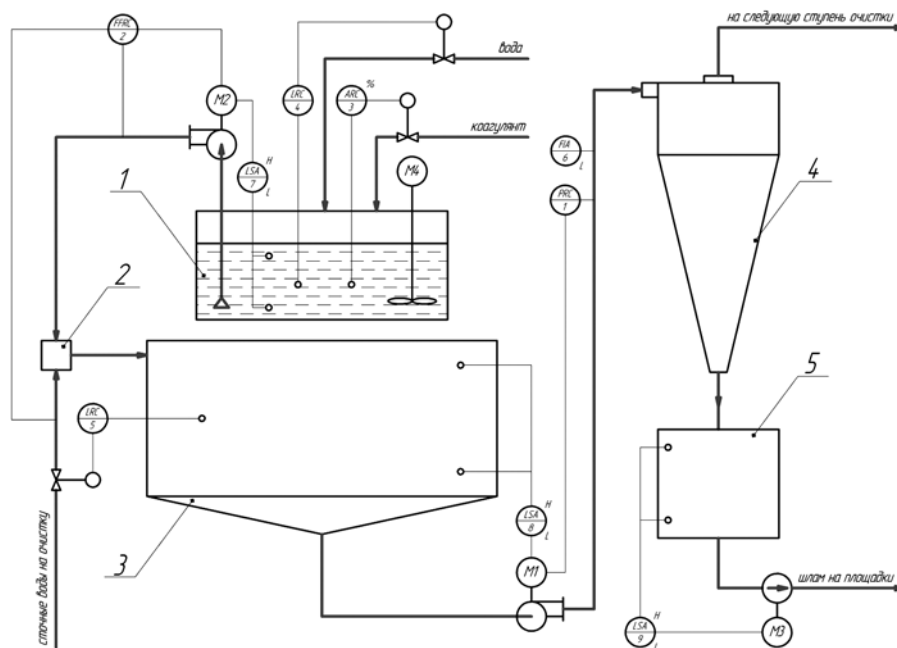


Рис. 1. Схема автоматизации процесса непрерывной коагулянтной очистки карьерных сточных вод

Fig. 1. An automation scheme of the continuous coagulant treatment process of open pit wastewaters

поддачи коагулянта в установку 1 с постоянным перемешиванием с помощью мешалки.

4. Систему автоматического регулирования уровня рабочего раствора коагулянта в установке 1 (см. рис. 1, LRC, поз. 4).

5. Систему автоматического регулирования уровня суспензии в выдерживателе 3 (см. рис. 1, LRC, поз. 5).

6. Систему автоматического контроля и сигнализации минимального расхода суспензии, подаваемой в гидроциклон (см. рис. 1, FIA, поз. 6). Снижение расхода суспензии до минимально критического значения свидетельствует о необходимости вывода гидроциклона из эксплуатации для его очистки от скопившейся дисперсной фазы.

7. Систему автоматической сигнализации предельных значений уровня рабочего раствора коагулянта в установке 1 и автоматической защиты электродвигателя M2 насоса от режима работы «сухой ход» (см. рис. 1, LSA, поз. 7).

8. Систему автоматической сигнализации предельных значений уровня суспензии в выдерживателе 2 и автоматической защиты электродвигателя M1 насоса от режима работы «сухой ход» (см. рис. 1, LSA, поз. 8).

9. Систему автоматической сигнализации предельных значений уровня шлама в бункере 5 и автоматической защиты электродвигателя M4 шламового насоса от режима работы «сухой ход» (см. рис. 1, LSA, поз. 9).

Поскольку давление в гидроциклоне считается основной технологической переменной, обеспечивающей заданную эффективность очистки [4, 7], в статье рассмотрен расчет и анализ системы автоматического регулирования давления суспензии, подаваемой в гидроциклон. Стабилизация давления возможна одним из способов [20]:

– изменением проходного сечения трубопровода подачи суспензии в гидроциклон за счет установки регулирующего органа;

– управлением производительностью перекачивающего насоса за счет использования частотно-регулируемого привода.

Последний способ более предпочтителен, так как позволяет снизить затраты потребляемой электроэнергии системой электропривода [19].

ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ И ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим структурную схему системы автоматического регулирования (стабилизации) давления в гидроциклоне (рис. 2) с позиций теории автоматического управления.

Объектом управления являются центробежный насос и участок трубопровода подачи суспензии в гидроциклон. Передаточная функция асинхронного электродвигателя в составе электропривода центробежного насоса (табл. 1) определена в соответствии со структурной схемой (рис. 3). Число пар полюсов асинхронного электродвигателя $n = 2$. Момент статической нагрузки на валу электродвигателя составил $M_c = 2,86$ Н·м.

Передаточная функция автоматического регулятора представлена в виде выражения (1).

$$W_{ap}(s) = k_n + \frac{k_{ин}}{s} + k_{д} \cdot s, \tag{1}$$

где k_n – коэффициент пропорциональной составляющей [Гц/Мпа]; $k_{ин}$ – коэффициент интегральной составляющей [Гц/Мпа·мин]; $k_{д}$ – коэффициент дифференциальной составляющей [Гц·мин/Мпа].

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Параметры настройки автоматического регулятора определены методом Циглера – Никольса (табл. 2).

Моделирование системы автоматического регулирования давления в гидроциклоне выполнено с применением инструментов приложения Simulink Matlab (рис. 4).

Графики переходных процессов показаны на рис. 5. Характер переходных процессов говорит об устойчивости САР. Динамическая ошибка ПИ-регулятора составляет не более 3%, ПИД-регулятора – не более 1% по отношению к заданному значению давления в гидроциклоне. Среднее время регулирования при 5% статической ошибке составляет около 0,1 мин. Следовательно, использование ПИД-регулятора в составе системы автоматического регулирования позволяет стабилизировать давление в гидроциклоне и обеспечить эффективность непрерывной коагулянтной очистки карьерных сточных вод.

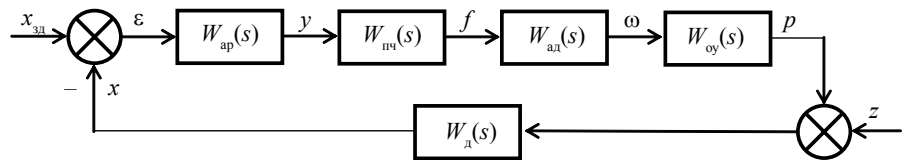


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического регулирования (стабилизации) давления в гидроциклоне: p – регулируемый параметр (давление в гидроциклоне), МПа; x – измеренное давление, МПа; $x_{зад}$ – заданное значение давления, МПа; ε – ошибка рассогласования, МПа; y – управляющее воздействие регулятора, Гц; z – возмущающее воздействие; f – частота переменного напряжения, Гц; ω – угловая скорость электродвигателя, c^{-1}

Fig. 2. A structural diagram of the automatic pressure control (stabilization) system in the hydrocyclone: p – controlled parameter (pressure inside the hydrocyclone), МPa; x – measured pressure, МPa; $x_{зад}$ – preset pressure value, МPa; ε – mismatch error, МPa; y – control action of the controller, Hz; z – disturbing action; f – frequency of the alternating current, Hz; ω – angular velocity of the electric motor, c^{-1}

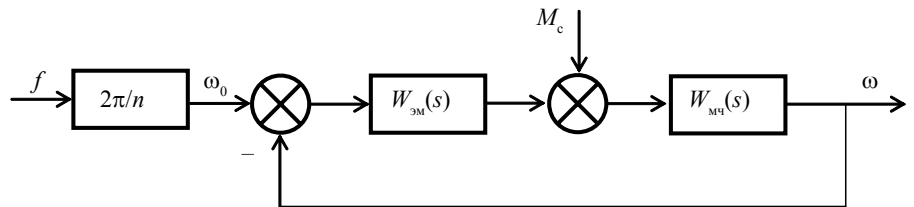


Рис. 3. Структурная схема асинхронного электродвигателя: n – число пар полюсов электродвигателя; f – частота переменного напряжения, Гц; ω_0 – номинальная угловая скорость электродвигателя, c^{-1} ; M_c – момент статической нагрузки, Н·м; ω – угловая скорость электродвигателя, c^{-1}

Fig. 3. A structural diagram of the asynchronous electric motor: n – number of the electric motor ports; f – frequency of alternating current, Hz; ω_0 – nominal angular speed of the electric motor, s^{-1} ; M_c – static load moment, N·m; ω – angular speed of the electric motor, c^{-1}

Таблица 1

Передаточные функции структурных схем

Transfer functions of structural diagrams

Наименование	Вид	Параметр	
		Обозначение, размерность	Значение
Передаточная функция объекта управления	$W_{оу}(s) = \frac{k_{оу}}{T_{оу} \cdot s + 1}$	Коэффициент передачи, $k_{оу}$, [Мпа/с ⁻¹] Постоянная времени, $T_{оу}$, [мин]	3,2 0,0021
Передаточная функция датчика	$W_{д}(s) = k_{д}$	Коэффициент передачи, $k_{д}$, [Мпа/Мпа]	1
Передаточная функция частотного преобразователя	$W_{пч}(s) = k_{пч}$	Коэффициент передачи, $k_{пч}$, [Гц/Гц]	1
Передаточная функция электромагнитной части асинхронного электродвигателя	$W_{эм}(s) = \frac{\beta}{T_{эм} \cdot s + 1}$	Коэффициент жесткости механической характеристики, β Электромагнитная постоянная времени, $T_{эм}$, [мин]	7,9 0,021
Передаточная функция механической части электродвигателя	$W_{мч}(s) = \frac{1}{J \cdot s}$	Динамический момент нагрузки, J , [кг·м ²]	8,14

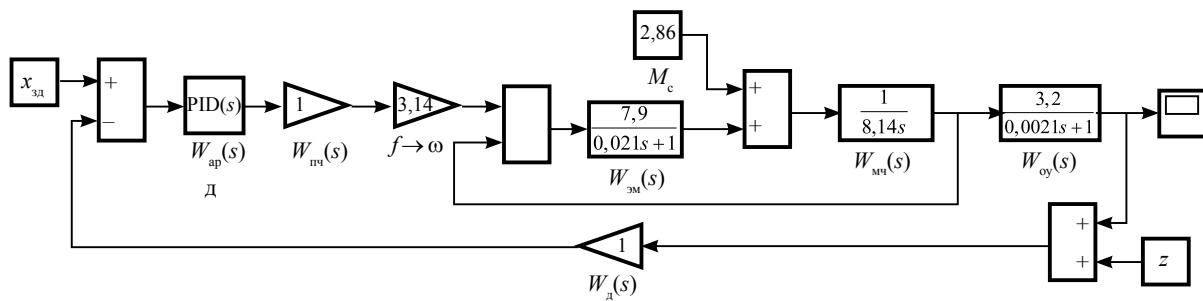


Рис. 4. Компьютерная модель системы автоматического регулирования давления в гидроциклоне:

$x_{зд}$ – заданное значение давления в гидроциклоне, МПа; $f \rightarrow \omega$ – звено, выполняющее преобразование частоты напряжения в угловую скорость электродвигателя; z – возмущающее воздействие

Fig. 4. A computer model of the automatic pressure control system in the hydrocyclone: $x_{зд}$ – preset pressure value, MPa; $f \rightarrow \omega$ – a link performing the transformation of the voltage frequency into the angular velocity of the electric motor; z – disturbing action

Таблица 2

Параметры настройки регулятора
Controller settings

Наименование	k_p	k_u	k_d
ПИ-регулятор	6,48	51,046	-
ПИД-регулятор	8,64	61,547	0,041

P , Мпа

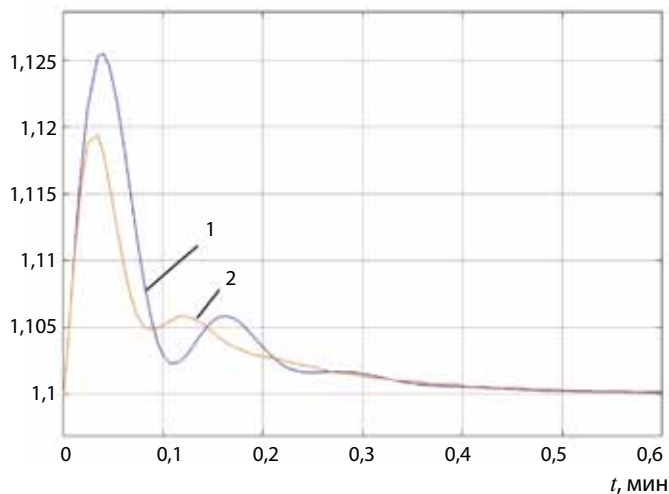


Рис. 5. Графики переходных процессов системы автоматического регулирования давления в гидроциклоне: 1 – ПИ-регулятор; 2 – ПИД-регулятор

Fig. 5. Charts of transient processes of the automatic pressure control system in the hydrocyclone: 1 – PI-controller; 2 – PID-controller

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система автоматизации процесса непрерывной коагулянтной очистки карьерных сточных вод угледобывающих предприятий позволяет обеспечить бесперебойное отведение и перекачку сточных вод, удаление из них примесей и загрязнений, а также сокращение затрат на эксплуатацию оборудования. Использование средств автоматизации позволяет повысить надежность работы очистного оборудования и стабилизировать параметры качества очистки стоков. Внедрение автоматизированных систем управления обеспечивает оперативность реакции на возможные изменения в работе оборудования процесса очистки при изменении количества и качества

очистки сточных вод или при сбое режимов функционирования оборудования. Предложенная система автоматизации может быть реализована с применением большинства современных программно-технических комплексов, которые осуществляют автоматический процесс управления оборудованием при обязательном взаимодействии с дежурным персоналом.

Список литературы • References

- Буренин В.В. Очистка и обезвреживание производственных сточных вод промышленных предприятий // Безопасность жизнедеятельности. 2019. № 1. С. 25-34.
Burenin V.V. Treatment and disposal of industrial wastewater from industrial enterprises. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2019;(1):25-34. (In Russ.).
- Ромащенко М.М., Нестерова Н.В. Промышленная очистка воды // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2019. № 1. С. 358-363.
Romashchenko M.M., Nesterova N.V. Industrial water treatment. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skohozyajst-vennogo naznacheniya*. 2019;(1):358-363. (In Russ.).
- Овчинников, Н.П., Зырянов И.В. Гидромеханизированный комплекс по очистке шахтных вод от крупных механических примесей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 5-2. С. 114-123. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-52-0-114.
Ovchinnikov N.P., Zyryanov I.V. Hydromechanized complex for purification of mine waters from large mechanical impurities. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2022;(5-2):114-123. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-52-0-114. (In Russ.).
- Фалова О.Е., Каменскова Т., Титова Д. Перспективные методы очистки сточных вод // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. 2019. № 10(28). С. 140-142.
Falova O.E., Kamenskova T., Titova D. Promising methods of wastewater treatment. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya*. 2019;10(28):140-142. (In Russ.).
- Модернизация оборудования и реконструкция заводов черной металлургии за рубежом // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2022. Т. 78. № 1. С. 86-91.
Modernization of equipment and reconstruction of ferrous metallurgy plants abroad. *Ferrous metallurgy. Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. 2022;78(1):86-91. (In Russ.).

6. Соломахин А.М., Боронтова М.А. Совершенствование систем очистки поверхностного стока предприятий // Молодой ученый. 2022. № 46(441). С. 18-22.
Solomahin A.M., Borontova M.A. Improving surface runoff treatment systems. *Molodoj uchenyj*. 2022;46(441):18-22. (In Russ.).
7. Применение аппаратов с интенсивной гидродинамической средой для очистки крупнотоннажных промышленных стоков от нерастворимых примесей / Д.В. Алексеев, А.А. Шагивалеев, Л.Р. Уразбахтина, и др. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 20. С. 234-241.
Alekseev D.V., Shagivaleev A.A., Urazbahtina L.R., Pavlova I.V. The use of devices with an intense hydrodynamic environment for the purification of large-scale industrial wastewater from insoluble impurities. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014;17(20):234-241. (In Russ.).
8. Rui Wang, Ziang Zhang, Xiaokang Yan, Haijun Zhang, Lijun Wang. Hydrocyclone separation enhancement of fine particles based on interface control. *Minerals Engineering*. 2024;(209):108-128. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108628.
9. Wenjie Lv, Kaiqing Zhao, Shihao Ma, Lingkai Kong, Zhihong Dang, Jianqi Chen, Yanhong Zhang, Jun Hu. Process of removing heavy metal ions and solids suspended in micro-scale intensified by hydrocyclone. *Journal of Cleaner Production*. 2020;(263):121-133. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121533.
10. Siti Khodijah Chaerun, Erian Jeremy, Raudhatul Islam Chaerun, Riri Lidya Fathira, Muhammad Iqbal Toynbee, Supandi Supandi, Tsutomu Sato. Coal mine wastes: Effective mitigation of coal waste slurry and acid mine drainage through bioflocculation using mixotrophic bacteria as bioflocculants. *International Journal of Coal Geology*. 2023;(279):104-117. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104370.
11. Ejimofor M.I., Ezemagu I.G., Menkiti M.C. Physiochemical, Instrumental and thermal characterization of the post coagulation sludge from paint industrial wastewater treatment. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2021;(37):150-160. DOI: 10.1016/j.sajce.2021.05.008.
12. Седова Е.Л., Воронцов К.Б., Буркова С.А. Влияние условий коагуляционной обработки на эффективность очистки лигнинсодержащей сточной воды по данным планированного эксперимента // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 4(370). С. 159-167. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.159.
Sedova E.L., Voroncov K.B., Burkova S.A. The influence of coagulation treatment conditions on the efficiency of purification of lignin-containing wastewater according to a planned experiment. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2019;4(370):159-167. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.159. (In Russ.).
13. Jianqi Chen, Lu Wang, Shihao Ma, Yujie Ji, Bing Liu, Yuan Huang, Jianping Li, Hualin Wang, Wenjie Lv. Separation of fine waste catalyst particles from methanol-to-olefin quench water via swirl regenerating micro-channel separation (SRMS): A pilot-scale study. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;(152):108-116. DOI: 10.1016/j.psep.2021.05.037.
14. Гераськин В.М. Развитие автоматизации и информационных технологий на Гайском ГОКе // Горный журнал. 2019. № 7. С. 40-42.
Geras'kin V.M. Development of automation and information technologies at Gaisky GOK. *Gornyj zhurnal*. 2019;(7):40-42. (In Russ.).
15. Ефремкин С.И., Верстаков Е.С., Пыльнева Д.В. Разработка автоматизированной системы плавучей насосной станции // Наукосфера. 2020. № 6. С. 235-237.
Efremkin S.I., Verstakov E.S., Pyl'neva D.V. Development of an automated floating pumping station system. *Naukosfera*. 2020;(6):235-237. (In Russ.).
16. Технология и автоматизированное управление процессами современной калийной обогатительной фабрики / Б.А. Вишняк, Т.В. Сереброва, И.В. Колунтаев и др. // Горная механика и машиностроение. 2021. № 1. С. 29-39.
Vishnyak B.A., Serebrova T.V., Koluntaev I.V., Hnykin A.G. Technology and automated process control of a modern potash concentration plant. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie*. 2021;(1):29-39. (In Russ.).
17. Окунев С.М., Герасименко Е.Г., Кобыляцкая О.Г. Результаты модернизации и автоматизации основного оборудования обогатительной фабрики // Горный журнал. 2022. № 6. С. 35-37.
Okunev S.M., Gerasimenko E.G., Kobylatskaya O.G. Results of modernization and automation of the main equipment of the concentration plant. *Gornyj zhurnal* 2022;(6):35-37. (In Russ.).
18. Разработка распределенной диспетчерской системы управления процессом доочистки карьерных сточных вод / С.Г. Пачкин, П.П. Иванов, Л.А. Иванова и др. // Уголь. 2023. № 10. С. 82-88. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-10-82-88.
Pachkin S.G., Ivanov P.P., Ivanova L.A., Mikhailova E.S., Semenov A.G. Development of a distributed dispatch control system for the process of post-treatment of quarry wastewater. *Ugol'*. 2023;(10):82-88. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-10-82-88.
19. Чайка В.А. Автоматизированный электропривод и система управления насосными агрегатами на Балхашской обогатительной фабрике // Молодой ученый. 2019. № 2(240). С. 37-40.
Chajka V.A. Automated electric drive and control system for pumping units at the Balkhash processing plant. *Molodoj uchenyj*. 2019;2(240):37-40. (In Russ.).
20. Чепурдеев А.А. Применение автоматизации на современной обогатительной фабрике // Научно-исследовательский Центр «Science Discovery». 2022. № 11. С. 612-619.
Chepurdeev A.A. Application of automation in a modern concentrator plant. *Nauchno Issledovatel'skij Tsentr "Science Discovery"*. 2022;(11):612-619. (In Russ.).

Authors Information

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

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

Kotlyarov R.V. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: kotlyarovrv@kuzstu.ru

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

Mikhailova 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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.04.2024

Поступила после рецензирования: 16.05.2024

Принята к публикации: 26.05.2024

Paper info

Received April 15, 2024

Reviewed May 16, 2024

Accepted May 26, 2024