

УДК 504.4.054 © С.Г. Пачкин✉, П.П. Иванов, Л.А. Иванова,
А.Г. Семенов, Е.С. Михайлова, 2025

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

UDC 504.4.054 © S.G. Pachkin✉, P.P. Ivanov, L.A. Ivanova,
A.G. Semenov, E.S. Mikhaylova, 2025

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

Модульный подход к управлению системой очистки карьерных сточных вод*

A modular approach to managing an open pit wastewater treatment system

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-4-102-107>

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.

В условиях постоянного расширения открытой добычи угля и ужесточающихся требований к экологической обстановке на территориях угледобычи в последнее время очень остро стоит задача комплексной очистки собираемых карьерных сточных вод. Традиционная технология очистки подразумевает два этапа: первичную гравитационную очистку в зумпфах-отстойниках и последующую доочистку на специализированных модулях, реализующих процессы реагентной, сорбционной, мембранной и других технологий. Выбор совокупности используемых модулей и их производительности должен определяться в зависимости от ряда факторов как технологического, так и экономического характера. Разработанная схема АСУТП участка доочистки позволяет в зависимости от текущих условий определить перечень используемых модулей и степень их использования, тем самым уменьшить эксплуатационные затраты участка при сохранении показателей качества очистки, которые будут определяться направлением использования очищенных сточных вод.

Ключевые слова: карьерные сточные воды, система автоматического управления, технологический модуль, модульная структура, структура автоматизированной системы управления.

Для цитирования: Модульный подход к управлению системой очистки карьерных сточных вод / С.Г. Пачкин, П.П. Иванов, Л.А. Иванова и др. // Уголь. 2025;(4):102-107. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-4-102-107.

Abstract

In conditions of constant expansion of surface coal mining and increasingly stringent requirements to the environmental condition in the coal mining areas, the problem of integrated treatment of the collected open pit wastewater has recently become very acute. The conventional treatment technology implies two stages. i.e. the primary gravitational treatment in settling ponds and the subsequent additional treatment in dedicated modules that utilize the processes of the reactant, sorption, membrane and other technologies. The selected set of modules to be used and their

productivity should be determined depending on a number of factors of both technological and economic nature. The developed flowchart of the automatic process control system of the post-treatment plant allows determining the list of modules to be used and the degree of their utilization depending on the current conditions, thus reducing the operating costs of the plant while maintaining the quality indicators of treatment, which will be defined by the utilization of the treated wastewater.

Keywords

Open pit wastewater, automatic control system, process module, modular structure, structure of automated control system.

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., Semenov A.G., Mikhaylova E.S. A modular approach to managing an open pit wastewater treatment system. *Ugol'*. 2025;(4):102-107. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-4-102-107.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается расширение открытой добычи угля, так как этот способ является более экономичным и безопасным с точки зрения охраны труда. Однако при данном способе добычи наблюдается значительное антропогенное воздействие на экосистемы районов добычи, выражающееся, в частности, в образовании значительного количества сточных вод, которые собираются в зумпфах и прудах-отстойниках, где происходит первая стадия очистки, выражающаяся в гравитационном осаждении взвешенных частиц.

Очищенная таким образом вода может повторно использоваться внутри карьеров, но, во-первых, ее потребляется значительно меньше, чем накапливается [1, 2], а во-вторых, это потребление характеризуется существенной неравномерностью. Это приводит к периодическому переполнению прудов-отстойников, что, в свою очередь, требует регулярного сброса воды в открытые природные источники. При этом для соблюдения нормативных показателей сточные воды должны проходить несколько этапов очистки.

Из анализа состава сточных вод различных угледобывающих предприятий Кузбасса установлено, что основными загрязнителями являются взвешенные вещества, нефтепродукты, растворенные соединения азота, марганца, цинка, железа, серы, фенолы и другие соединения органической и неорганической природы [3, 4].

Существует большое количество технологических решений очистки сточных вод, но они не предусматривают возможности адаптации к текущей вариативности загрязнителей на конкретном объекте в имеющихся технологических условиях изменения как количественных, так и качественных показателей собираемых карьерных сточных вод, которые могут быть вызваны изменением гидрогеологических условий добычи, факторами сезонности и ме-

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

СЕМЕНОВ А.Г.

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

теоретическими условиями. Это обстоятельство ведет к необходимости постоянной адаптации используемой технологии очистки.

В то же время некоторое количество частично очищенной воды может направляться на повторное использование на смежные предприятия или технологические нужды карьера, где в каждом случае требуются различные показатели качества воды [2], что ведет к изменению расходных характеристик основного технологического потока, а иногда и к полному отключению некоторых модулей системы очистки.

Основная проблема при таком режиме работы – это постоянно изменяющиеся условия эксплуатации очистных сооружений, что требует создания системы мониторинга всех возникающих условий и своевременного переключения на требуемые режимы работы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Рассмотрев исследования степени загрязнения сточных вод угольных карьеров Кузбасса и проанализировав способы очистки от выявленных загрязнителей, было выделено семь основных методов очистки. Объединив все эти методы в общую технологическую систему, можно получить строгую последовательность их использования. При технической реализации такой системы очистки предлагается каждый из этих методов выделить в отдельный модуль, обозначив его созвучно названию метода:

- модуль 1 – корректировка pH;
- модуль 2 – коагуляция;
- модуль 3 – флокуляция;
- модуль 4 – механическая фильтрация;
- модуль 5 – обратный осмос;
- модуль 6 – адсорбция;
- модуль 7 – бактерицидная обработка.

Первые три модуля относятся к многоступенчатой реагентной очистке. Модуль 1 используется для стабилизации pH в сточных водах, что позволяет оптимизировать работу последующих стадий реагентной очистки сточных вод. Модуль 2 используется для очистки сточных вод от взвешенных частиц, а также железа, кальция, марганца, общего хрома и т.д. [5]. Модуль 3 необходим для очистки сточных вод от органических соединений, жиров, масел и нефтепродуктов.

Модуль 4 обеспечивает механическую очистку сточных вод на напорных фильтрах с зернистой загрузкой и осуществляет более глубокую очистку от взвешенных частиц, оставшихся после реагентной очистки.

Модуль 5 используется для обессоливания водных растворов мембранными методами от большинства ионов высокомолекулярных химических соединений.

Модуль 6 обеспечивает очистку воды от ионов аммония, фенола, соединений азота, сульфатов, а также ионов тяжелых металлов (железа, марганца и др.). Если этот модуль используется после обратного осмоса, то он направлен на доочистку воды от следов тяжелых металлов.

Модуль 7 необходим для уничтожения бактерий и других микроорганизмов за счет облучения воды в ультрафиолетовой установке.

В качестве ведущих факторов, вносящих изменения в условия проведения процессов очистки, можно выделить изменение количества, состава и концентрации загрязнителей в сточных водах, которые определяются: гидрогеологическими условиями добычи; временем года (сезона); теоретическими условиями.

При этом вначале решаются задачи по определению перечня модулей и их производительности. Условно это можно назвать этапом синтеза технологической схемы очистки. Данный выбор опирается на качественный состав загрязнителей в подаваемых сточных водах и зависит от величины притока сточных вод и степени их загрязнения теми или иными поллютантами.

В дальнейшем после ввода системы очистки в эксплуатацию требуется решать задачи, обеспечивающие оптимальное управление процессом:

- поддержание уровня воды в прудах-отстойниках в допустимых пределах;
- обеспечение требуемых предельно-допустимых значений загрязнений в очищенной воде, направляемой в реку или же сторонним потребителям;
- поддержание заданного расхода воды сторонними потребителями;
- оптимизация расходов энергии и материалов на единицу очищенной воды и др.

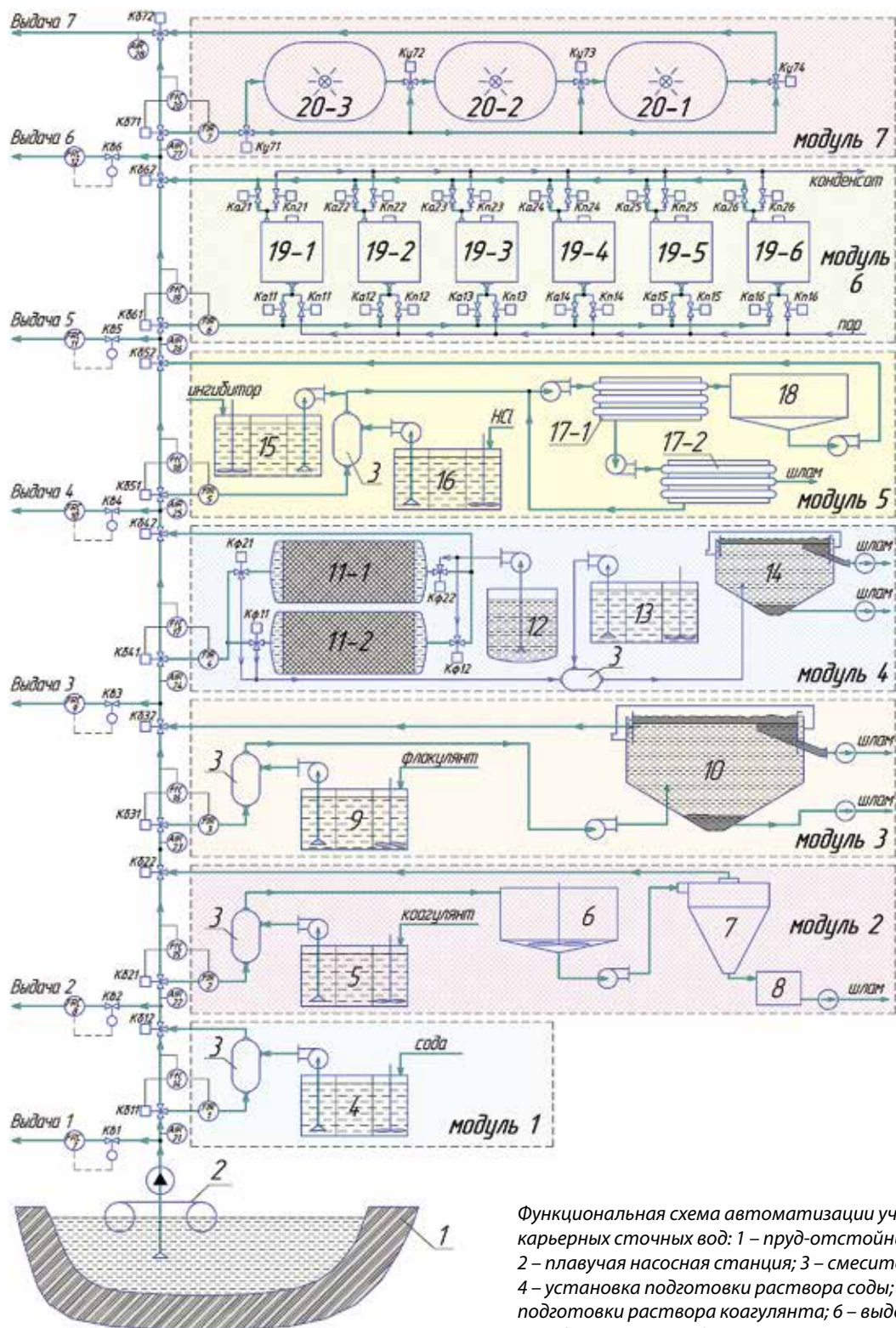
При этом в каждом модуле используется своя специализированная система автоматического управления, обеспечивающая режим работы, необходимый для достижения требуемого качества очистки при минимизации текущих расходов. А на основе полученной информации может потребоваться коррекция режимов работы модуля, вплоть до изменения состава вспомогательных веществ, например, корректировка состава коагулянта или флокулянта и поддержание оптимального соотношения их расходов с учетом количества подаваемой на очистку воды.

ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ И ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Для оперативного решения описанных задач разработана общая система автоматизированного управления технологическим процессом очистки сточных карьерных вод, условно разделенная на семь выделенных ранее модулей (см. рисунок).

Для обеспечения стабильной работы модуля 1 при сохранении заданных производственных показателей реализована САР корректировка pH, особенностью которой является использование алгоритма управления, созданного с элементами нечеткой логики, что позволяет решить задачу нелинейности статической и динамической характеристик процесса на фоне существенного отличия расходов смешивающихся потоков. Предложенный подход позволяет проводить корректировку установки в динамическом режиме, согласуя ее с изменяющимися условиями внешней среды [6].

Во 2-ом модуле качество очистки достигается за счет использования двух основных систем регулирования, обеспечивающих стабилизацию соотношения расходов сточной воды и коагулянта, а также давления в гидроци-



11 – фильтры; 12 – резервуар чистой воды для промывки фильтров; 15 – установка подготовки раствора ингибитора; 16 – установка подготовки раствора кислоты; 17 – мембранные модули; 18 – буферная емкость; 19 – адсорберы с неподвижным слоем сорбента; 20 – УФ-стерилизатор

Fig. 1. Functional automation diagram of the open-pit wastewater treatment plant: 1 – settling pond; 2 – floating pumping station; 3 – mixers; 4 – soda solution preparation unit; 5 – coagulant solution preparation unit; 6 – holding tank; 7 – hydrocyclone; 8 – sludge hopper; 9, 13 – flocculant solution preparation unit; 10, 14 – floatators; 11 – filters; 12 – clean water tank for filter washing; 15 – inhibitor solution preparation unit; 16 – acid solution preparation unit; 17 – membrane modules; 18 – buffer tank; 19 – adsorbers with fixed sorbent bed; 20 – UV sterilizer

клоне, что реализуется за счет применения непрерывных замкнутых САР с ПИД регулятором [7].

В модуле флотационной очистки достаточно стабилизировать соотношение расходов очищаемой воды и подаваемых растворов реагентов с обязательной коррекцией по степени загрязненности подаваемых сточных вод [8].

Учитывая, что в модуле фильтрации используются напорные фильтры с зернистой загрузкой, требующие периодической регенерации фильтрующего слоя, осуществляемой путем вывода аппарата из технологического процесса, то для оптимизации работы модуля и обеспечения неразрывности потока очищаемых вод фильтры установлены парно. При этом система управления работой фильтров обеспечивает перенаправление потоков при достижении предельного гидравлического сопротивления фильтрующего слоя, которое оценивается по перепаду давления между входом и выходом фильтра. На этапе промывки используется автоматическая система, предусматривающая утилизацию полученных промывочных вод, характеризующихся значительным загрязнением [9].

Автоматизированная система управления обратноосмотическим оборудованием предполагает регулирование давления фильтруемой среды на входе в модуль. Контроль перепада давлений на входе и выходе обратноосмотического аппарата позволяет оценить степень загрязненности фильтрующей мембраны, и при достижении критического уровня система автоматического управления переводит поток очищаемых сточных вод на резервный обратноосмотический модуль, после чего регенерация обратноосмотического фильтра осуществляется в автоматическом режиме по специальной программе [10, 11].

Особенностью аппаратного оформления шестого модуля является использование батареи адсорберов с неподвижным слоем сорбента, рабочий цикл каждого из которых смещен друг относительно друга. Это обстоятельство требует использования системы автоматического управления переключением потока между аппаратами. При этом для увеличения продолжительности работы между циклами регенерации используется каскадная система регулирования, обеспечивающая снижение скорости подачи сточных вод в адсорбер по мере насыщения сорбента в соответствующем аппарате [12].

Система регулирования модуля бактерицидной очистки предполагает подключение дополнительных УФ-стерилизаторов для обеспечения необходимого времени обработки очищаемых сточных вод при изменении величины их потока [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одна из задач, решаемых при разработке системы очистки воды, – это повторное использование очищенной сточной воды внутри карьера или сторонними предприятиями. Разработанная схема управления (см. рисунок) предусматривает возможность выдачи воды потребителю (регулирующие клапаны $Kв1...Kв6$), если достигнутая на данном этапе степень очистки воды

удовлетворяет его требованиям. Перечень потребителей и объемы подачи очищенной воды определяются отдельно для каждого предприятия [2]. Это может повлиять на выбор перечня используемых модулей и на их производительность. Поэтому за счет установки в трубопровод подачи сточных вод байпасных клапанов $Kб11...Kб72$ любой из этих модулей может быть использован полностью или частично (вплоть до полного отключения) в зависимости от:

- химического состава и концентрации поллютантов в очищаемых сточных водах;
- объема очищаемых сточных вод;
- степени очистки, определяемой нормативными значениями или требованиями сторонних потребителей;
- метеорологических условий;
- сезонных факторов;
- гидрогеологических условий добычи.

Одним из факторов повышения эффективности процесса очистки является увеличение цикла работы модулей, которое может быть достигнуто за счет уменьшения нагрузки на них. Данную задачу в разработанной системе предлагается решать путем разделения потока воды на любом модуле на два параллельных потока. Один поток идет напрямую, минуя тот или иной модуль очистки, а другой проходит через него. На выходе из модуля оба потока соединяются, и за счет контроля степени загрязнения смешанного потока (датчики AIR21...27) задается коэффициент пропорциональности для системы регулирования соотношения расходов этих потоков (FfC14...28). При этом датчики загрязнения позволяют регистрировать качество воды, подаваемой сторонним потребителям.

В случае повышения загрязненности исходных сточных вод по какому-либо показателю, когда рассчитанная предварительно мощность одного из модулей не может обеспечить должной очистки воды, система позволяет производить разбавление очищенных вод водой, прошедшей через один из следующих модулей, обеспечивающий удаление указанного загрязнителя. Это позволит снизить концентрацию этого загрязнителя и поддержать расчетный режим эксплуатации данного модуля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В большинстве случаев сточные воды представляют собой многокомпонентный раствор органических и неорганических загрязнений, для эффективного разделения которого могут использоваться различные методы очистки. Выбор совокупности методов определяется химическим составом, концентрацией загрязнителей и объемом подаваемых на очистку сточных вод, а также требуемой степенью очистки, которая будет определяться направлением дальнейшего использования очищенных сточных вод. В зависимости от типа и количества этих факторов предложенная АСУ ТП участка очистки карьерных сточных вод позволяет в любой момент времени подобрать оптимальную совокупность модулей и их производительность, а также значения ключевых технологических параметров для каждого модуля.

Список литературы • References

- Гусев Н.Н. Эколого-экономическая оценка вовлечения шахтных вод в хозяйственный оборот // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 7. С. 245-248.
Gusev N.N. Environmental and economic assessment of mine water commercialization. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2010;(7):245-248. (In Russ.).
- Организация повторного использования карьерных сточных вод угледобывающих предприятий / П.П. Иванов, С.Г. Пачкин, Л.А. Иванова и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2024. № 3. С. 190-199. DOI: 10.15372/FTPRI20240320.
Ivanov P.P., Pachkin S.G., Ivanova L.A., Mikhailova E.S., Semenov A.G. Wastewater reuse in open pit coal mines. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2024;(3):190-199. (In Russ.). DOI: 10.15372/FTPRI20240320.
- Оценка эффективности очистки сточных вод угледобывающего предприятия и ее влияние на загрязнение малых рек / Л.А. Иванова, Н.С. Голубева, И.В. Тимошук и др. // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 1. С. 60-65. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-1-60-65.
Ivanova L.A., Golubeva N.S., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Prosekov A.Yu., Sapurin Z.P., Medvedev A.V. Evaluation of the efficiency of wastewater treatment of a coal mining enterprise and its impact on the pollution of small rivers. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2023;27(1):60-65. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2023-1-60-65.
- Maiti D., Ansari L., Rather M., Deepa A. Comprehensive review on wastewater discharged from the coal-related industries – characteristics and treatment strategies. *Water Science and Technology*. 2019;79(11):C. 2023-2035. DOI: 10/2166/wst.2019.195.
- Выбор сорбента для элиминации ионов железа из сточных и природных 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 pishchevykh proizvodstv*. 2024;54(2):398-411. (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2516.
- Автоматизация процесса регулирования pH в схеме очистки карьерных сточных вод угледобывающих предприятий / П.П. Иванов, С.Г. Пачкин, В.П. Иванова и др. // Уголь. 2024. № 7. С. 84-90. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-84-90.
Ivanov P.P., Pachkin S.G., Ivanova V.P., Semenov A.G., Mikhaylova E.S. Automation of the pH control process in treatment of surface coal mine runoff water. *Ugol'*. 2024;(7):84-90. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-84-90.
- Автоматизация процесса непрерывной коагулянтной очистки карьерных сточных вод / П.П. Иванов, С.Г. Пачкин, Р.В. Котляров и др. // Уголь. 2024. № 6. С. 101-106. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-101-106.
Ivanov P.P., Pachkin S.G., Kotlyarov R.V., Ivanova I.A., Mikhaylova 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.
- Нарбатыров Т.Ж. Автоматизация процессов флотации // Интернаука. 2024. № 18-3. С. 65-68.
Narbatyrov T.Zh. Automation of flotation processes. *Internauka*. 2024;(18-3):65-68. (In Russ.).
- Meireles M., Prat M., Estachy G. Analytical modeling of steady-state filtration process in an automatic self-cleaning filter. *Chemical engineering research and design*. 2015;(100):15-26.
- Safarov I. Automation of clean drinking water supply processes in agriculture systems. *Economics and society*. 2023;11(114):2: 390-393.
- Anis S.F., Hilal N., Hashaikh R. Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review. *Desalination*. 2019;(452):159-195. DOI: 10.1016/j.desal.2018.11.006.
- Pachkin S.G., Ivanov P.P., Ivanova L.A., Semenov A.G., Mikhaylova E.S. Automated Control of Sorptional Treatment of Mine Wastewater. *Coke and Chemistry*. 2023;66(10):522-525. DOI: 10.3103/s1068364x23701168.
- Грудинкин А.П., Пискарева В.М. Технологические и технические особенности метода обеззараживания воды ультрафиолетом // Сантехника. 2024. № 5. С. 52-56.
Grudinkin A.P., Piskareva V.M. Technological and technical features of water disinfection using UV light method. *Santekhnika*. 2024;(5): 52-56. (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

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

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 9.12.2024

Поступила после рецензирования: 28.02.2025

Принята к публикации: 25.03.2025

Paper info

Received December 9, 2024

Reviewed February 28, 2025

Accepted March 25, 2025