

УДК 54.084

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-5-16>

Научная статья

Research article



Совершенствование системы контроля и управления параметрами электролитического рафинирования меди

Нгуен Хю Хоанг, В.Ю. Бажин**Санкт-Петербургский горный университет**

199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

✉ Владимир Юрьевич Бажин (bazhin-alfoil@mail.ru)

Аннотация: Использование современных автоматизированных систем управления в производстве катодной меди обеспечивает возможность удаленного доступа к ресурсам для контроля и регулирования параметрами электролитического процесса, что определяет показатели эффективности производства при снижении энергетических затрат. Важными параметрами в электролитическом рафинировании меди являются температура и состав электролита, скорость его циркуляции, уровень шлама, частота замыканий между электродами и плотность тока, которые напрямую влияют на количество и объем катодного осадка. Наличие коротких замыканий на ванне обуславливается ростом дендритов, что влечет за собой необходимость контролировать напряжение, состав и температуру электролита и периодически анализировать состав и накопление объема шламового осадка на дне электролизера. Интенсификация процесса электролиза происходит в основном за счет повышения плотности тока, снижения межэлектродного расстояния, улучшения качества электродов, совершенствования системы циркуляции электролита при дальнейшей механизации и автоматизации самого процесса и его вспомогательных операций, ведущих к повышению производительности. Целью данной работы являлось расширение функций автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) за счет внедрения датчиков контроля уровня шламового осадка для снижения безвозвратных потерь при наличии замыканий дендритного осадка на электроды в нижней донной части электролизера с использованием нового программного обеспечения. Рассмотрен способ контроля уровня шламового осадка для предотвращения коротких замыканий и разработана программа контроля при помощи датчиков уровня поплавкового типа. Данное мероприятие при внедрении позволит снизить расход электроэнергии на 15–20 %, что может быть полезным для внедрения в цехах электролитического производства меди на предприятии «Медеплавильный завод» (г. Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам).

Ключевые слова: катодная медь, шламовый осадок, электроды, замыкание, датчик, электролит, система контроля, электролитическое рафинирование.

Для цитирования: Нгуен Хю Хоанг, Бажин В.Ю. Совершенствование системы контроля и управления параметрами электролитического рафинирования меди. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):5–16. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-5-16>

Improvement of monitoring and control system for copper electrolytic refining parameters

Nguyen Huy Hoang, V.Yu. Bazhin**Saint Petersburg Mining University**2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russia

✉ Vladimir Yu. Bazhin (bazhin-alfoil@mail.ru)

Abstract: The utilization of modern automated control systems in copper cathode production offers the opportunity for remote access to control and regulate the electrolytic process parameters. This, in turn, enhances production efficiency while reducing energy costs. The significant parameters in copper electrolytic refining encompass the temperature and composition of the electrolyte, the circulation rate

of the electrolyte, the level of sludge, and the frequency of short circuits occurring between the electrodes and the current density. These parameters directly impact the quantity and volume of cathode sludge. The occurrence of short circuits within the bath arises from the growth of dendrites, necessitating the monitoring of voltage, composition, and temperature of the electrolyte. Regular analysis of the electrolyte's composition and the accumulation of sludge volume at the bottom of the electrolyzer is also necessary. The intensification of the electrolysis process primarily involves increasing the current density, reducing the electrode spacing, enhancing the quality of electrodes, improving the electrolyte circulation system, and further mechanizing and automating the process and its auxiliary operations. These efforts contribute to increased productivity. The objective of this study is to expand the capabilities of automated process control systems by incorporating sludge level control sensors. This aims to mitigate irrecoverable losses resulting from dendritic sludge short circuits on the electrodes located in the lower section of the electrolyzer, utilizing new software. A sludge level control method to prevent short circuits has been investigated, and control software employing float-type level sensors has been developed. This measure is projected to decrease energy consumption by 15–20 % and can be effectively implemented in the production of electrolytic copper at the copper smelting plant in Lao Cai, Vietnam.

Key words: copper cathode, sludge sediment, electrodes, short circuit, sensor, electrolyte, control system, electrolytic refining.

For citation: Nguyen Huy Hoang, Bazhin V.Yu. Improvement of monitoring and control system for copper electrolytic refining parameters. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):5–16. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-5-16>

Введение

Повышение эффективности работы энергоемких металлургических производств является первостепенной задачей для дальнейшего развития устойчивой работы минерально-сырьевого комплекса. С другой стороны, излишнее увлечение новыми приемами цифровой трансформации может только усложнить поставленные задачи по энергетической эффективности крупнотоннажных производств [1; 2].

Анализ существующих систем контроля и управления, применяемых на предприятиях по производству катодной меди, указывает на недостаточность количества регулируемых параметров для устойчивой работы электролизеров [3–5]. Для более эффективного управления производственным процессом необходим ввод новых функциональных точек контроля с дополнительными датчиками. Это, в некоторой степени, относится и к действующим производствам по получению катодной меди, например к электролитическим производствам меди на предприятии «Медеплавильный завод» (г. Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам) [6; 7].

В рамках выполняемой работы необходимо решить задачи по расширению функциональных свойств автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) и внести соответствующие корректировки в блоки базы данных (БД) на основе полученных математических моделей для управления и оптимизации процессов, связанных с образованием шламового осадка в нижней части электролитической ячейки. В данном случае необходимо установить блок согласования показателей датчика температуры, контроллера уровня электролита и поплавкового регулятора с учетом их взаимного влияния для сопоставления

полученных данных со стандартными параметрами в целях выявления аномалий в ходе процесса. Такое решение направлено на настройку дополнительных устройств в рамках существующей параметризации для достижения оптимальных условий процесса. В частности, необходима функция раннего обнаружения короткого замыкания электродов из-за различного типа нарушений для своевременного предупреждения оператора об отклонении и для более быстрой обработки данных для последующего управляющего воздействия, направленного на разрушение и ликвидацию локальных мест срастания дендритов с учетом их объема и количества в нижней части ванны. Во время увеличения уровня осадка за счет попадания частиц шлама в межэлектродное расстояние происходит изменение концентрации электролита.

Таким образом, в данной работе необходимо решить вопросы расширения функций АСУ ТП за счет установки датчиков контроля уровня осадка для снижения безвозвратных потерь путем уменьшения количества замыканий дендритного осадка на электродах в нижней донной части электролизера, а также установки дополнительного датчика контроля состава электролита.

Регулируемые технологические параметры электролитического рафинирования меди

Электролитическое получение меди является физико-химическим процессом, протекающим при большом массиве регулируемых параметров, от которых зависит ход технологического процесса, и характеризуется существенным количеством скрытых показателей, влияющих на протекание

электрохимических процессов при существующих проблемах с адекватной идентификацией различных стадий процесса [8–10]. К основным входным параметрам этого процесса относят, в первую очередь, содержание в электролите ионов меди, концентрацию серной кислоты и их соответствие выходным параметрам, которые определяют производительность и выход по току [11–13]. Таким образом, эффективность электролитического рафинирования меди во многом зависит от состояния электролизеров (ванн) относительно шламообразования в верхней и нижней частях электродов. Если дендритные замыкания в верхней части ячейки можно увидеть и зарегистрировать через тепловизионную камеру, то отложения на электродах в нижней части ванны представляют собой своеобразный «черный ящик».

В ходе технологического процесса необходимы контроль и анализ во всем объеме электролитической ячейки текущих изменений следующих параметров (с учетом дополнительных условий контроля в стандартной АСУ ТП) [14–16]:

- 1) химический анализ содержания меди в электролите и серной кислоты;
- 2) текущая температура электролита;
- 3) скорость циркуляции электролита;
- 4) сила тока на серии;
- 5) плотность тока на электродах;
- 6) напряжение электролизной ячейки;
- 7) уровень шлама при контроле через поплавковый погружной датчик;
- 8) концентрация хлорид-иона в электролите;
- 9) давление и расход пара;
- 10) передача и транспортирование части рабочего электролита на слив;
- 11) смешивание электролита после нескольких периодов циркуляций через расходные и запасные баки;
- 12) непрерывное расчетное дозирование добавок серной кислоты и сульфата меди в через дозаторы;
- 13) разбавление и изменение концентрации электролита отработанной промывной водой и конденсатом при вводе в электролит серной кислоты;
- 14) катодная плотность тока;
- 15) загрузка и установка анодов через заданный период и время их растворения в результате электролиза.

Также необходим анализ взаимосвязи между всеми рабочими параметрами, который свидетельствует о необходимости уточнения и ввода дополнительных данных — таких, как содержание ионов меди, уровень электролита и шламового осадка.

Все системы контроля и управления производством должны учитывать входные технологические параметры, обеспечивающие высокое качество и чистоту выпускаемой продукции — катодной меди. При электролитическом рафинировании меди отсутствует наличие функциональных связей между количеством образующегося осадка на электродах и шлама на дне ванны с количеством и объемом дендритных нарастаний и замыканий на электродах, особенно после их разрушений, что приводит к изменению концентрации электролита в ванне. В известных работах [17–19] предлагается множество способов определения значений входных параметров для устойчивого управления процессом электролиза, но в основном с использованием текущих данных (БД) предприятий [20–22].

В ходе работы были получены математические модели для нескольких сценариев процесса на различных его стадиях во время образования осадка на дне электролизной ячейки.

1-й сценарий — образование налипания в нижней части электродов. Этот механизм связан с попаданием отдельных частиц осадка на нижнюю часть поверхности электродов при неконтролируемой высоте осадка при разрушении дендритного срастания в верхней части катода. «Взмучивание» электролита приводит к изменению его содержания, особенно в нижней части ванны.

2-й сценарий — подъем верхних слоев осадка к поверхности анодов и катодов с образованием срастаний между электродами. Причина — высокая турбулентность электролита и самого шламового осадка.

3-й сценарий — полное замыкание между электродами при касании шламового осадка их нижних частей. Причина заключается в том, что не контролируется высота слоя шламового осадка в электролизной ячейке и не учитывается амплитуда движения электролита и шлама.

Как правило, по статистическим данным, на предприятии по производству катодной меди электролитическим способом за 24 ч происходит до 15–20 случаев по различным сценариям, но наиболее часто наблюдается 1-й сценарий (до 10 случаев в сутки). На рис. 1, 2 представлены модели для всех трех сценариев

Параметрический анализ процесса электролиза помогает определить взаимосвязь между входными данными (БД) процесса электролиза (межэлектродное расстояние, сила тока, плотность тока, сопротивление электролита с учетом концентрации ионов меди) и их влиянием на такие выходные

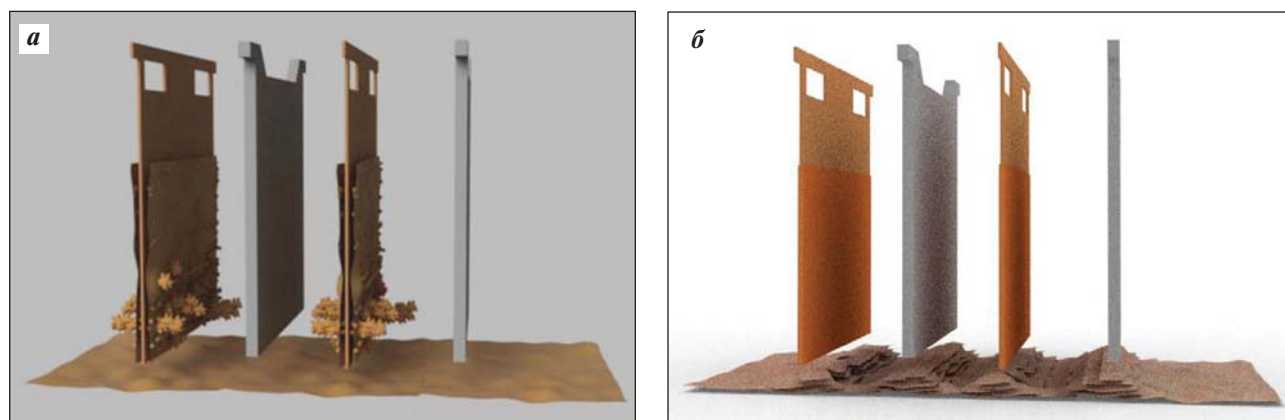


Рис. 1. Модель образования и изменения уровня шламового осадка при средней (а) и высокой (б) турбулентности электролита

Fig. 1. Model of sludge formation and level change at medium (а) and high (б) electrolyte turbulence



Рис. 2. Модель полного замыкания электродов при касании осадка нижней части электродов

Fig. 2. Model of complete short-circuiting of the electrodes when the sludge touches the lower part of the electrodes

показатели электролитического рафинирования, как выход по току и производительность [23; 24]. Но при этом необходимы учет и контроль дополнительных параметров процесса, например уровня шлама на дне ванны и показателя pH [25].

В этой связи при построении математической модели использовался параметрический анализ процесса электролитического рафинирования меди (процессы 1.1, 1.2 и 2 на рис. 3) [26–28] как вспомогательный прием для вычисления и анализа управляющих воздействий при возникающей производственной ситуации (по сценариям) в соответствии с полученной блок-схемой.

Для блок-схемы и расчетной математической модели процесса были приняты следующие показатели: входные параметры по составу элект-

ролита — содержание серной кислоты $C_{H_2SO_4} = 150$ г/л; концентрация сульфата меди $C_{CuSO_4} = 279,78$ г/л; содержание меди $C_{Cu} = 50$ г/л; при заданном составе электролита получены: выход по току $\eta_{Cu}^* = 96\%$ и производительность $Пр_{Cu}^* = 50$ т/сут; $d_{Пр}$, d_{Cu} — соответственно производительность процесса и выход по току для электролитических процессов 1.1 и 1.2, которые отличаются по значению; в данном случае управляющие воздействия — плотность тока (D) и скорость циркуляции (V).

Известна разработка математической модели процесса электролитического рафинирования меди [3], в рамках которой получены многопараметрические математические модели с использованием множественного регрессионного анализа [29–31]. Для корректировки АСУ ТП и контроля осадка с учетом текущего значения выхода по току можно применить уравнение (1), а для производительности — уравнение (2):

$$\begin{aligned} \eta_{Cu} = & 885,52052 + 0,01869V + 0,01048D^2 - \\ & - 5,79232D + 1,43 \cdot 10^{-4}(C_{H_2SO_4})^2 - \\ & - 0,01231C_{H_2SO_4} + 0,09 \cdot 10^{-5}(C_{Cu})^2 - 4,98 \cdot 10^{-3}C_{Cu} + \\ & + 3,5 \cdot 10^{-4}(C_{H_2SO_4})^2 - 0,07688C_{CuSO_4}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Пр_{Cu} = & -122,6664 + 0,0145V - 2,4 \cdot 10^{-3}D^2 + \\ & + 1,30096D + 3,6 \cdot 10^{-4}(C_{H_2SO_4})^2 - 0,09653C_{H_2SO_4} + \\ & + 4,4 \cdot 10^{-5}(C_{Cu})^2 - 2,7 \cdot 10^{-3}C_{Cu} + \\ & + 2,1 \cdot 10^{-4}(C_{CuSO_4})^2 - 0,0436C_{CuSO_4}. \end{aligned} \quad (2)$$

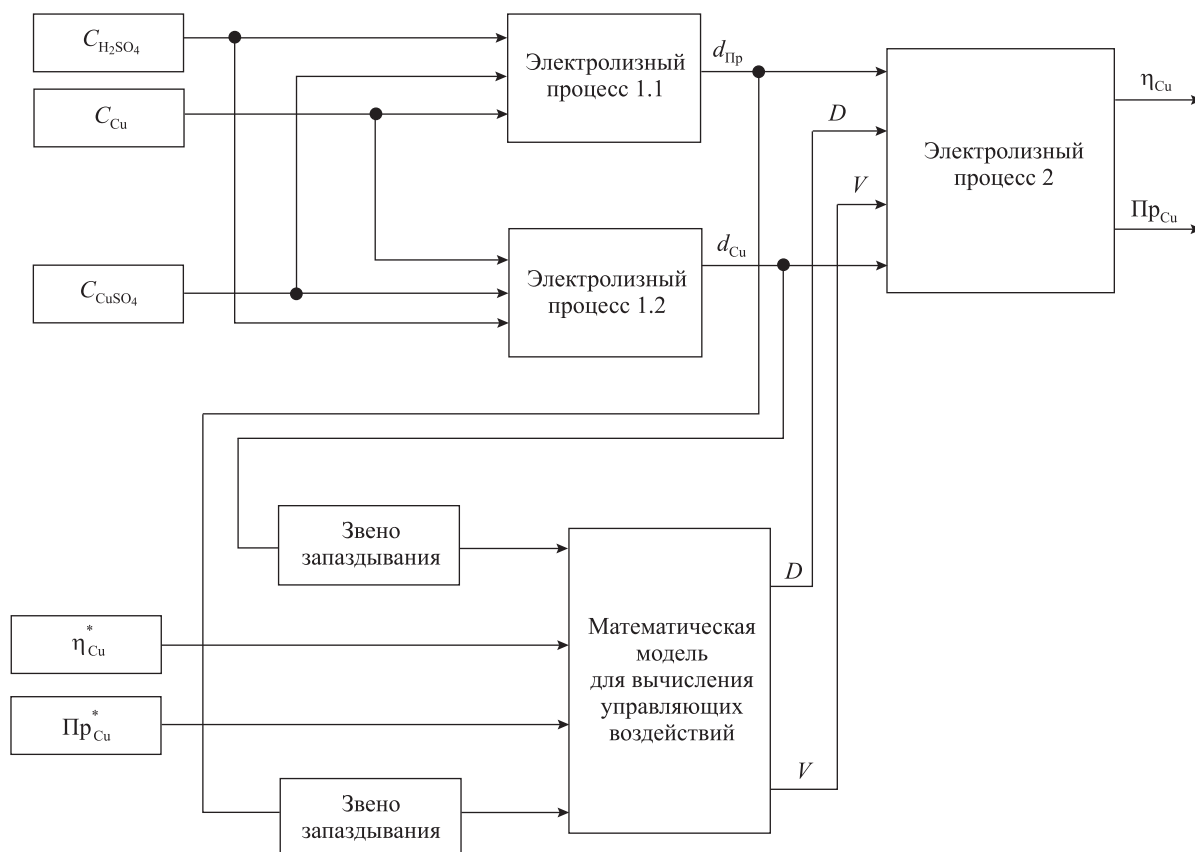


Рис. 3. Блок-схема математической модели параметрического анализа электролитического производства катодной меди

Fig. 3. Block diagram of the mathematical model for the parametric analysis of cathode copper electrolytic production

Тогда дополнительное параметрирование отражает истинные значения выхода по току и производительности с учетом обнаруженных отклонений при последующей корректировке технологического режима через управляющее воздействие (см. блок-схему на рис. 3). Блок-схема основана на математической модели процесса электролитического рафинирования и модели функциональных связей текущих значений управляющих величин (плотности тока D и скорости циркуляции V) путем сравнения значений производительности (Пр_{Cu}) и выхода по току (η_{Cu}) при согласовании с заданными параметрами процессов 1.1 и 1.2 с учетом коэффициента запаздывания. В отличие от существующей модели были внесены корректировки в соответствии с предполагаемыми тремя механизмами образования шламового осадка и дендритными срастаниями на электродах.

С помощью установленного режима контроля и управления при условиях (1) и (2) на основе выполненной математической модели процесса электро-

литического рафинирования меди и блок-схемы может быть получена зависимость плотности тока и сопротивления от межэлектродного расстояния (рис. 4). Ее данные указывают на то, что диапазон изменения плотности тока находится в рациональных пределах $D = 250 \div 300 \text{ А/м}^2$, а межэлектродное расстояние изменяется в интервале $0,045 \div 0,055 \text{ м}$.

При оценке влияния плотности тока выявлено, что номинальная производительность достигает оптимального значения, когда управляющее воздействие D находится в диапазоне $260 \div 280 \text{ А/м}^2$ (рис. 5).

Основываясь на проведенном параметрическом анализе, можно обосновать ввод дополнительных входных параметров процесса электролиза.

Значение содержания ионов меди также является очень важным фактором. По мере роста концентрации Cu^{2+} увеличивается выход по току и снижается напряжение на ванне, когда уменьшается уровень осадков. Высокая концентрация меди позволяет повысить выход по току. Обычно

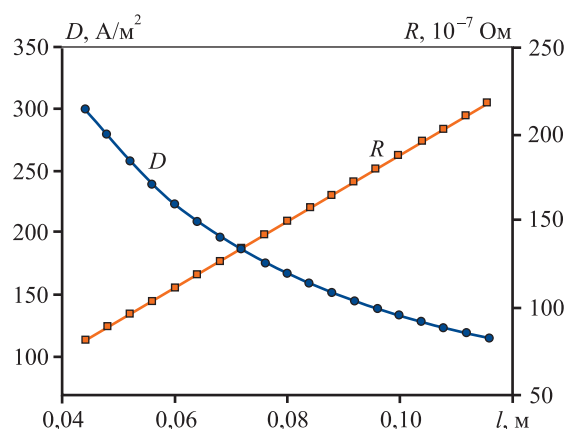


Рис. 4. Влияние межэлектродного расстояния на плотность тока и сопротивление

Fig. 4. Influence of inter-electrode distance on current density and resistance

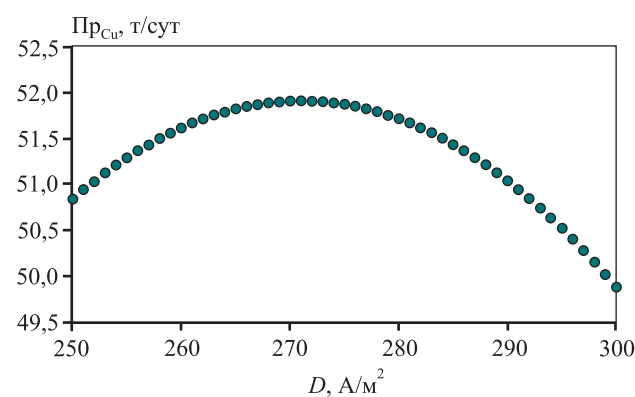


Рис. 5. Зависимость производительности процесса от плотности тока

Fig. 5. Dependence of the process productivity on the current density

концентрацию меди поддерживают, в пересчете на двухвалентный катион меди, на уровне 40–60 г/л.

Необходимо отметить, что содержание серной кислоты существенно сказывается на выходе по току и расходе электроэнергии. Как правило, ее уровень поддерживают в интервале $C_{H_2SO_4} = 100\div150$ г/л.

Рост температуры влияет на увеличение выхода по току, но при снижении напряжения на ванне повышаются значения электропроводности электролита. В диапазоне температур 20–70 °С наблюдается общая тенденция увеличения дисперсности, при этом физические свойства электролита ухудшаются и начинает растворяться катодный осадок. Поэтому температуру электролита поддерживают на уровне 50–60 °С, а его циркуляцию в ваннах проводят для поддержания в нем заданной

температуры, снижения расслоения электролита из-за различных плотностей растворов $CuSO_4$ и H_2SO_4 и его составляющих и стабилизации процесса перемешивания электролита для насыщения прикатодного слоя ионами меди [4]. Из полученных расчетных данных следует, что скорость циркуляции электролита необходимо выдерживать постоянной на уровне 20 л/мин.

Совершенствование системы контроля и управления процессом электролиза при вводе дополнительных параметров

При электролитическом рафинировании меди контролируется масса анодов и катодов, анодных остатков, катодного скрапа, исходных катодов, применяемых реагентов; вычисляется объем выводимого из циркуляции электролита и вводимых объемов серной кислоты; определяется уровень электролита в баковой аппаратуре и т.д. Наибольшее значение имеет контроль за составом и температурой электролита, а также процесс обнаружения коротких замыканий между анодами и катодами при расчетных значениях скорости циркуляции электролита и дополнительном контроле содержания электролита и уровня шлама на дне ванны.

Для контроля содержания меди и кислоты в электролите применяются малогабаритные анализаторы (типа МАК-1 и МАК-2). Для определения расхода пара, воды, электролита используют дифманометры с регистраторами, а температуру измеряют термометрами сопротивления. Применение датчиков температуры с дистанционным управлением позволило полностью автоматизировать регулирование температуры электролита [32; 33].

Для обнаружения и устранения коротких замыканий, приводящих к нарушениям нормального подвода тока к электроду и снижению выхода по току, используют различные методы. Находят применение гауссметры, термочувствительные краски, инфракрасные датчики. Представляет большой интерес для внедрения способ обнаружения коротких замыканий с помощью установленной на мостовом кране, обслуживающем электролизные ванны, камеры с датчиком инфракрасного излучения (тепловизора) [34–37]. С использованием современных методов трудозатраты на контроль за короткими замыканиями сокращаются до 30 % по сравнению с традиционными системами контроля. Выход по току повышается на 2 %.

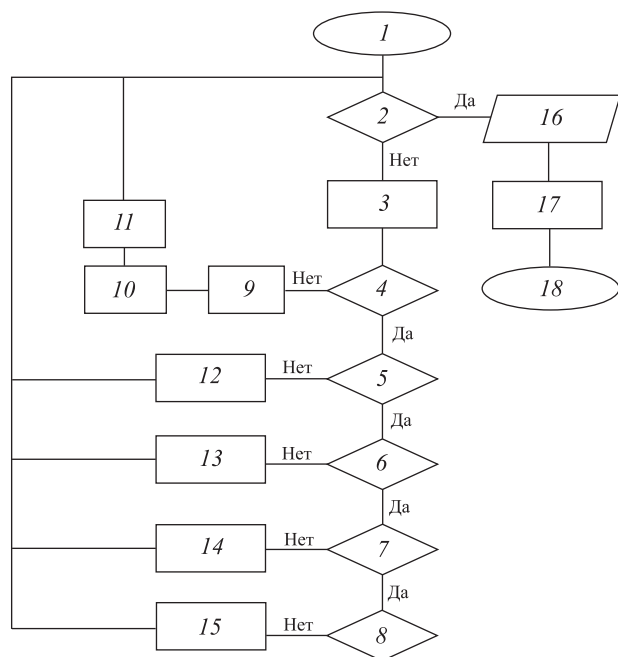


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы программы ЭВМ

Fig. 6. Block diagram of the software algorithm

На основании вышеперечисленных факторов создана программа для ЭВМ, позволяющая более эффективно контролировать технологические характеристики электролиза меди. Алгоритм работы программы показан на рис. 6.

На блок-схеме приняты следующие обозначения для передачи входных данных и управляющих воздействий:

1 — начало процесса (ввод параметров в базу данных);

2 — проверка длительности процесса (τ , мин) и окончательный тайминг (при достижении 48 ч процесс считается завершённым);

3 — сбор следующих текущих данных от датчиков:

- температура электролита (t , °C);
- напряжение (U , В);
- уровень шлама ($H_{\text{ш}}$, м);
- уровень электролита (H_3 , м);
- концентрация серной кислоты в электролите ($C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$, кг/м³);

4 — проверка температуры электролита в допустимых пределах $t_3 < 85$ °C;

5 — проверка напряжения между электродами при необходимом значении $U = 0,314$ В; напряжение имеет функцию отклика, который на практике не регулируется;

6 — проверка уровня шлама в допустимых пре-

делах $H_{\text{ш}} < 0,4$ м (нет замыкания в нижней части электрода);

7 — проверка уровня электролита;

8 — проверка концентрации серной кислоты в электролите;

9 — начало сканирования тепловизором поверхности ячейки (в ванне);

10 — определение зон перегрева электролита (с короткими замыканиями); указать на экране номера катода и анода;

11 — устранить короткое замыкание и зафиксировать время (тайминг);

12 — направить шлам на слив в приемник;

13 — добавить электролит до заданного целевого уровня;

14 — добавить серной кислоты в электролит до целевого значения концентрации;

15 — вывод на экран отчета о процессе изменения параметров электролиза;

16 — завершение процесса корректировки параметров электролиза;

17 — стабилизация процесса и вывод на нормальный технологический режим;

18 — регулятор переточной системы для удаления шлама.

На рис. 7 представлена схема цифровой автоматизации электролитической ванны для рафинирования меди.

На рис. 8 показан скриншот разработанной программы контроля шламового осадка и дендритных срастаний.

В соответствии с изменениями, происходящими на электролизере, может варьироваться межэлектродное расстояние, а следовательно, и устав-ка по напряжению. Дополнительно, при обнаружении значительных отклонений, может быть изменена и амперная нагрузка.

В результате, в ходе изучения проблем устойчивой работы электролизных ячеек, была создана система контроля и управления основными параметрами процесса производства катодной меди. Программное обеспечение состоит из следующих продуктов:

- блок питания BMXCPS3500;
- процессорный модуль «Modicon M580 P58 2040»;
- модуль дискретного ввода BMXDDI 1602, число дискретных входов 16;
- модуль аналогового входа-выхода BMXAMM0600, число дискретных входов 8 в соответствии с действиями алгоритма;
- модуль дискретного выхода BMXDDO 1602, число аналоговых входов 16.

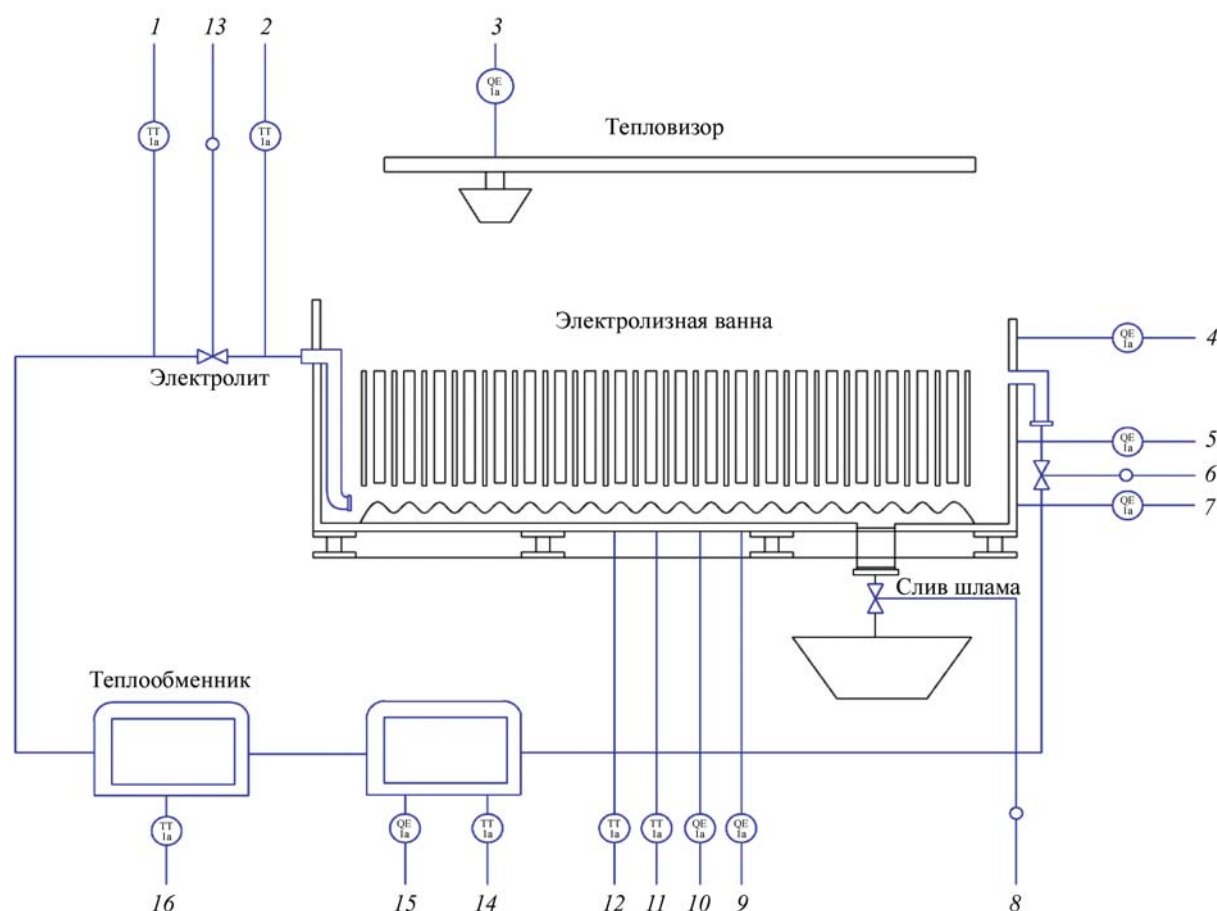


Рис. 7. Схема цифровой автоматизации электролитической ванны для рафинирования меди

Fig. 7. Diagram of digital automation of the electrolysis bath for copper refining

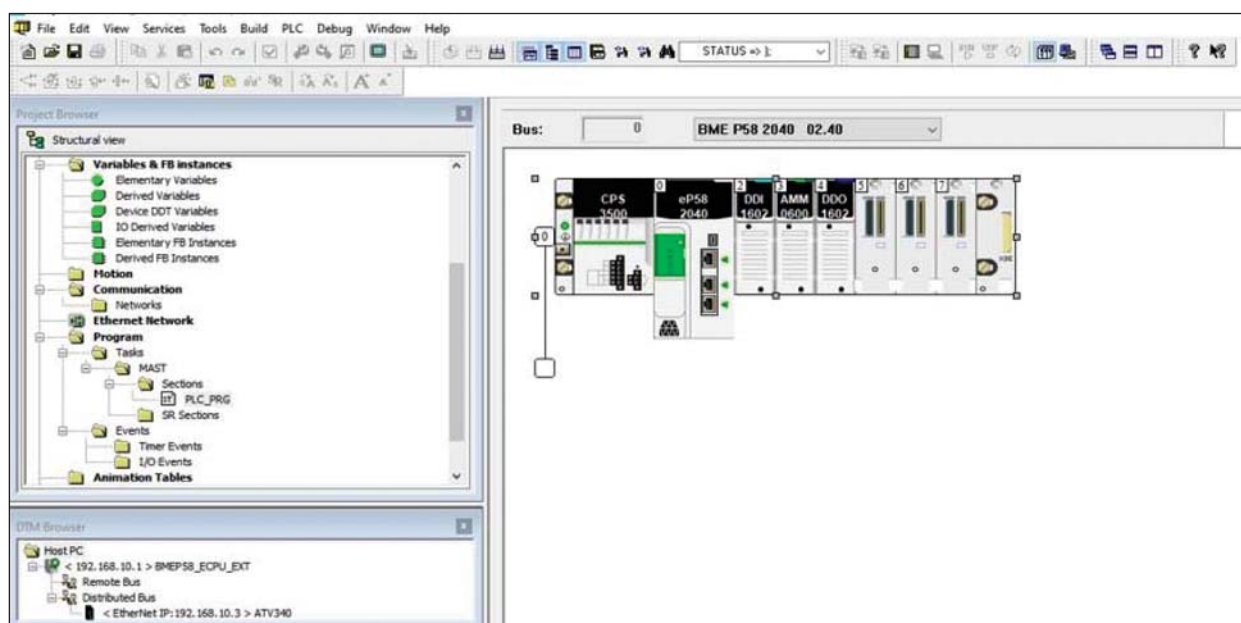


Рис. 8. Скриншот разработанной программы контроля шламового осадка и дендритных срастаний

Fig. 8. Screen shot of the developed software for sludge and dendritic accretions control

Программное обеспечение разработано в среде «Unity XL Pro» от компании «Schneider Electric» (Франция) и русифицировано для применения в среде SE (System Electric).

Дополнительные функции управления процессом через АСУ ТП позволяют более эффективно и своевременно устранять технологические отклонения. Повышение частоты замены катодов и проведения операции шламоудаления приводят к снижению экономических показателей процесса.

Заключение

Установлено, что интенсификация процесса электролиза происходит в основном за счет повышения значения плотности тока и улучшения работы системы циркуляции электролита для поддержания постоянной концентрации ионов меди при стабилизации температуры электролита.

Для дополнительного контроля за процессом обоснована необходимость внедрения датчиков уровня шламового осадка для снижения безвозвратных потерь катодной меди при отсутствии замыканий дендритного осадка на электроды в нижней донной части электролизера. Построены модели образования катодного осадка (шлама) и дендритных замыканий на электродах. Анализ возможных проблем и отклонений, связанных с образованием шламового осадка, дал возможность смоделировать ряд возможных сценариев процесса.

Разработанный алгоритм управления и программа ЭВМ для дополнительных действий в системе АСУ ТП позволяют снизить энергетические потери (на 10–15 %) и повысить выход по току (на 2 %).

Данные разработки будут полезны для внедрения в существующие системы АСУ ТП электролитического рафинирования меди для предприятия «Медеплавильный завод» (г. Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам).

Список литературы/References

1. Litvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2022;338:130530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530>
2. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020;29:1521–1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>
3. Potekhin D.V., Galkin S.V. Use of machine learning technology to model the distribution of lithotypes in the permo-carboniferous oil deposit of the usinskoye field. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:41–51. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.101>
4. Qingyu Zeng, Chun Li, Yi Meng, Jun Tie, Rentao Zhao, Zhifang Zhang. Analysis of interelectrode short-circuit current in industrial copper electrorefining cells. *Measurement*. 2020;164:108015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108015>
5. Mansouri N., Khayati G.R., Mohammad Hasani Zade, Mohammad Javad Khorasani S., Kafi Hernashki R. A new feature extraction technique based on improved owl search algorithm: a case study in copper electrorefining plant. *Neural Computing and Applications*. 2022;34:7749–7814. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06881-z>
6. Таранцева К.Р., Фаюстова Ю.А. Эффективность очистки сточных вод от ионов железа, меди и никеля сорбентом из шлама водоочистки. *Экология и промышленность России*. 2023;27(2):22–25. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-2-22-25>
Tarantseva K., Fayustova Yu. Efficiency of wastewater treatment from iron, copper and nickel ions by sorbent from water purification sludge. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(2):22–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-2-22-25>
7. Мансурова О.К., Читкова Я.В. Исследование процессов при электролитическом рафинировании меди. В сб.: *Инновационные научные исследования: теория, методология, практика*: Материалы XX Междунар. науч.-практ. конференции (Пенза, 23 февраля 2020 г.). Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 47–52.
8. Shestakov A.K., Petrov P.A., Nikolaev M.Yu. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminum plant based on technical vision and a neural network. *Metallurgist*. 2023;66:1308–1319. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01445-z>
9. Мастюгин С.А., Волкова Н.А., Набойченко С.С., Ласточкина М.А. Шламы электролитического рафинирования меди и никеля. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 256 с.
10. Худяков П.Ю., Федорова С.В., Симонов А.Ю., Старцев И.М., Лаптев В.А. Автоматическая система идентификации коротких замыканий в электролизных ваннах. *Датчики и системы*. 2020;(9-10(251)):61–66. <https://doi.org/10.25728/datsys.2020.9-10.11>
Khudyakov P.Yu., Fedorova S.V., Simonov A.Yu., Startsev I.M., Laptev V.A. Automatic short circuit identification system in electrolysis baths. *Datchiki i Sistemy (Sensors and Systems)*. 2020;(9-10(251)):61–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.25728/datsys.2020.9-10.11>

11. Вольхин А.И., Чухланцев Н.М., Плеханов И.Д., Спирин В.Е., Серикова В.В., Сизов В.А., Винник В.И.. Устройство для обнаружения коротких замыканий в ваннах электролиза меди: Патент 55779 (РФ). 2006.
12. Горонько В.А. Устройство для определения тока короткого замыкания в электролизных ваннах: Патент 140216 (СССР). 1960.
13. Захаров Л.А., Мартышев Д.А., Пономарева И.Н. Прогнозирование динамического пластового давления методами искусственного интеллекта. *Записки Горного института*. 2022;253:23–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11>
Zakharov L., Martyshev D., Ponomareva I.N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:23–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11>
14. Салимжанова Е.В., Девочкин А.И., Юдин Е.В., Карпушова Д.Д. Разработка и внедрение технических решений по приведению качества катодной меди полярного деления в соответствие со стандартом Лондонской биржи металлов. *Цветные металлы*. 2018;6:44–51. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.06.06>
Salimzhanova E.V., Devochkin A.I., Yudin E.V., Karpushova D.D. Development and introduction of technical solutions to bring the quality of polar division cathode copper to conformity with London Metal Exchange standard. *Tsvetnye Metally*. 2018;6:44–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.06.06>
15. Mohammad Reza Shojaei, Gholam Reza Khayati, Seyed Mohammad Javad Korasani, Roya Kafi Harnashki. Investigating the nodulation mechanism of copper cathode based on microscopic approach: As a punch failure factor. *Engineering Failure Analysis*. 2022;133:105970. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105970>
16. Zakaev D., Nikolaichuk L., Irina F. Problems of oil refining industry development in Russia. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020;13(2):267–270. <https://doi.org/10.37624/IJERT/13.2.2020.267-270>
17. Jingya Zhao, Yi Meng, Chun Li, Jun Tie. The effect of nodulation on the distribution of concentration and current density during copper electrolytic refining. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2285:012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2285/1/012015>
18. Газалеева Г.И., Назаренко Л.Н., Шигаева В.Н. Схема технологического процесса обогащения черновых концентратов, содержащих мелкие шламы оловянных и медных минералов. *Обогащение руд*. 2018;(6(378)):20–26. <https://doi.org/10.17580/or.2018.06.04>
Gazaleeva G.I., Nazarenko L.N., Shigaeva V.N. Process flow design for upgrading rough concentrates containing fine slimes of tin and copper minerals. *Obogashchenie Rud*. 2018;(6(378)):20–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2018.06.04>
19. Ding L., Li Q., Yuan J., Dong X., Peng D., Li B., Li H., Xue Y., Niu Y. Characteristic and control of electrochemical oscillation at the anode during electrolytic refining copper. *International Journal of Electrochemical Science*. 2020;15(9):9532–9542. <https://doi.org/10.20964/2020.09.85>
20. Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Korolev A.A., Timofeev K.L., Krayukhin S.A., Pikulin K.V. Impurity distribution during electrolytic refining of antimony. *Metallurgist*. 2021;64:1198–1207. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01105-0>
21. Boikov A.V., Payor V.A., Savelev R.V. Technical vision system for analyzing the mechanical characteristics of birk materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;944:012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012021>
22. Шклярский Я.Э., Батуева Д.Е. Разработка алгоритма выбора режимов работы комплекса электроснабжения с ветродизельной электростанцией. *Записки Горного института*. 2022;253:115–126. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.7>
Shklyarskiy Y.E., Batueva D.E., Operation mode selection algorithm development of a wind-diesel power plant supply complex. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:115–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.7>
23. Ding L., Cheng J., Wang T., Zhao J., Chen C., Niu Y. Continuous electrolytic refining process of cathode copper with non-dissolving anode. *Minerals Engineering*. 2019;135:21–28. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.032>
24. McNulty B.A., Jowitt S.M., Belousov I. The importance of geology in assessing by- and coproduct metal supply potential; a case study of antimony, bismuth, selenium, and tellurium within the copper production stream. *Economic Geology*. 2022;117(6):1367–1385. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4919>
25. Correa P.P., Cipriano A., Nunez F., Salas J.C., Lobel H. Forecasting copper electrorefining cathode rejection by means of recurrent neural networks with attention mechanism. *IEEE Access*. 2021;9:79080–79088. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074780>
26. Zhang J., Chen H., Fan B., Shan H., Chen Q., Jiang C., Hou G., Tang Y. Study on the relationship between crystal plane orientation and strength of electrolytic copper foil. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;884:10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161044>
27. Ostanin N.I., Rudoy V.M., Demin I.P., Ostanina T.N., Nikitin V.S. Statistical analysis of the distribution of im-

- purities during copper electrorefining. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62(5):501–507.
<https://doi.org/10.3103/S1067821221050102>
28. Boikov A.V., Savelev R.V., Payor V.A., Potapov A.V. Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using DEM. Part 2. *CIS Iron and Steel Review*. 2020;20:3–6.
<https://doi.org/10.17580/cisr.2020.02.01>
 29. Васильева Н.В., Бойков А.В., Ерохина О.О., Трифонов А.Ю. Автоматизированная оцифровка круговых диаграмм. *Записки Горного института*. 2021;247:82–87. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.9>
Vasilyeva N.V., Boikov A.V., Erokhina O.O., Trifonov A.Yu. Automated digitization of radial charts. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:82–87. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.9>
 30. Кашин Д.А., Кульчицкий А.А. Контроль качества металлургических брикетов на основе изображений брикетированной металлошихты. *Цветные металлы*. 2022;9(957):92–98.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2022.09.13>
Kashin D.A., Kulchitskiy A.A. Image-based quality monitoring of metallurgical briquettes. *Tsvetnye Metally*. 2022;9(957):92–98. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/tsm.2022.09.13>
 31. Sharikov Y.V., Cabascando V.E.Q. Mathematical modeling of mass, heat and fluid flow in a reverberatory furnace for melting nickel-containing raw materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753:1–8.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012064>
 32. Bian Y., Su L., Yu Z., Lv Z., Chen H., Zhou Y., Lin M. Graphite/copper phthalocyanine composite cathode for overcharge protection and gas evolution suppression in aluminum-ion batteries at room temperature. *Electrochimica Acta*. 2019;332:1–23.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135188>
 33. Sonawane J.M., Pant D., Ghosh P.C., Adeloju S.B. Polyaniline—copper composite: A non-precious metal cathode catalyst for low-temperature fuel cells. *Energy Fuels*. 2021;35(4):3385–3395.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c04152>
 34. Van Doremalen R.F.M., Van Netten J.J., Van Baal J.G., Vollenbroek-Hutten M.M.R., Van der Heijden F. Validation of low-cost smartphone-based thermal camera for diabetic foot assessment. *Diabetes Research and Clinical Practice*. 2019;149:132–139.
<https://doi.org/10.1016/j.diabres.2019.01.032>
 35. Han Ji-H., Khoo E., Bai P., Bazant M.Z. Overlimiting current and control of dendritic growth by surface conduction in nanopores. *Scientific Reports*. 2014;4(7056):1–8.
<https://doi.org/10.1038/srep07056>
 36. Зубов В.П., Тхан Ван Зуи, Федоров А.С. Технология подземной разработки мощных пластов угля с низкими прочностными характеристиками. *Уголь*. 2023;(5):37–45.
<http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-37-45>
Zubov V.P., Than Van Duy, Fedorov A.C. Technology of underground mining of thick coal seams with low strength properties. *Ugol'*. 2023;(5):37–45. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-37-45>
 37. Пряхин Е.И., Трошина Е.Ю. Изучение технологических и эксплуатационных особенностей высокотемпературостойких композитных пленок для лазерной маркировки деталей из черных сплавов. *Черные металлы*. 2023;(4):74–80.
<https://doi.org/10.17580/chm.2023.04.12>
Pryakhin E.I., Troshina E.Yu. Study of technological and operational features of high-temperature-resistant composite films for laser marking of parts made of ferrous alloys. *Chernye metally*. 2023;(4):74–80. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/chm.2023.04.12>

Информация об авторах

Нгуен Хю Хоанг — аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета.

<https://orcid.org/0000-0001-7025-8654>

E-mail: huyhoangmta45@gmail.com

Владимир Юрьевич Бажин — д.т.н., проф., заведующий кафедрой металлургии Санкт-Петербургского горного университета.

<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

E-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

Information about the authors

Nguyen Huy Hoang — Postgraduate Student of the Department of automation of technological processes and production, Saint Petersburg Mining University.

<https://orcid.org/0000-0001-7025-8654>

E-mail: huyhoangmta45@gmail.com

Vladimir Yu. Bazhin — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of metallurgy, Saint Petersburg Mining University.

<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

E-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

Вклад авторов

Нгуен Хю Хоанг — проведение экспериментов, написание программы и части статьи.

В.Ю. Бажин — определение цели работы, написание части статьи, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the authors

Nguyen Huy Hoang — conducting experiments, writing the software and part of the article.

V.Yu. Bazhin — determination of the purpose of the work, writing part of the article, participation in the discussion of the results.

Статья поступила в редакцию 30.03.2023, доработана 14.04.2023, подписана в печать 20.04.2023

The article was submitted 30.03.2023, revised 14.04.2023, accepted for publication 20.04.2023