



Научная статья

УДК 669.347

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-532-544>

Идентификация короткого замыкания электродов по тепловому излучению при электролитическом рафинировании меди

Владимир Юрьевич Бажин^{1✉}, Хю Хоанг Нгуен²^{1,2}Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия¹bazhin-alfail@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>²huyhoangmta45@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7025-8654>

Резюме. Цель – повышение эффективности контроля и автоматизированного управления технологическим состоянием электролитических ячеек при рафинировании меди путем распознавания и идентификации короткого замыкания между электродами. Для проведения экспериментальных работ использовался лабораторный стенд, состоящий из двух последовательно включенных в электрическую цепь ячеек. Метод обнаружения короткого замыкания основан на получении инфракрасного излучения с помощью сканирующего тепловизора (Optris PI 400i / PI 450i) при определении участков с высокими значениями температур поверхности электрода и электролита. Алгоритм обнаружения короткого замыкания был разработан и протестирован с помощью программного обеспечения MATLAB при использовании функций Image Processing Toolbox MATLAB. Предложен способ распознавания и идентификации (при помощи сканирующего цифрового тепловизора) короткого замыкания между электродами электролитической ячейки. Способ позволяет комплексно оценить площадь контакта, определить время начала замыкания и степень нагрева электродов в зоне короткого замыкания, установить значения температур на всех участках, включая и температуру электролита во всем объеме ячейки. Предложен алгоритм поиска мест коротких замыканий в электролизере, заключающийся в сборе и сопоставлении полученных данных для регулирования межэлектродного расстояния (обеспечивающего устойчивый энергетический режим всей электролитической серии) и определении точного положения каждого катода в ячейке с помощью пороговой обработки инфракрасных изображений, полученных тепловизором. Показано, что быстрая идентификация мест коротких замыканий в электролизере (с начала контакта между электродами) и регистрация скорости роста площади дендритного срастания и температуры электролита позволяют своевременно устранять технологические нарушения во время работы электролитической ванны. Таким образом, разработанный способ идентификации короткого замыкания для комплексного определения и распознавания общего технологического состояния электролитической ячейки при электролитическом рафинировании меди позволяет достигать устойчивого энергетического режима с минимальными отклонениями по температуре процесса.

Ключевые слова: электролитическое рафинирование меди, катодная медь, цифровой тепловизор, ИК-изображения, неразрушающий контроль, цифровой двойник

Благодарности: Данная работа выполнена на оборудовании Научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов» Санкт-Петербургского горного университета в рамках научного направления «Энергосберегающие технологии».

Для цитирования: Бажин В. Ю., Нгуен Хю Хоанг. Идентификация короткого замыкания электродов по тепловому излучению при электролитическом рафинировании меди // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 532–544. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-532-544>.

METALLURGY

Original article

Identification of electrode short circuits during the electrolytic refining of copper based on heat radiation

Vladimir Yu. Bazhin^{1✉}, Huy Hoang Nguyen²^{1,2}St. Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

© Бажин В. Ю., Нгуен Хю Хоанг, 2022

Abstract. This study is aimed at improving the efficiency of monitoring and automated control over the technological state of electrolytic cells during copper refining using the recognition and identification of short circuits between the electrodes. Experimental works were performed on a laboratory bench consisting of two cells connected in series to the electrical circuit. The method of detecting short circuits is based on measuring infrared radiation using a scanning thermal imager (Optris PI 400i / PI 450i) for determining areas with elevated temperatures of electrode and electrolyte surfaces. A short-circuit detection algorithm was developed and tested in MATLAB environment using the Image Processing Toolbox MATLAB functions. The proposed method for recognizing and identifying short circuits between the electrodes of an electrolytic cell is based on using a scanning digital thermal imager. This method allows a comprehensive assessment of the contact area, determination of both the start time of a short circuit and the degree of electrode heating in the short-circuit zone, as well as establishment of temperature values in all areas, including the electrolyte temperature in the entire volume of the cell. An algorithm for searching for short-circuit locations in an electrolytic cell is proposed. This algorithm involves the collection of data and its comparison for adjusting the inter-electrode distance, ensuring a stable energy mode for the entire electrolytic line, and determining the exact position of each cathode in the cell using the threshold processing of infrared images obtained by a thermal imager. It was established that timely identification of short circuit locations in the electrolytic bath (since the onset of a contact between the electrodes), as well as recording of the growth rates of a dendritic coalescence area and electrolyte temperature, ensure timely elimination of technological disturbances during the operation of electrolytic baths. Thus, the developed method of short circuit identification for comprehensive determination and recognition of the technological state of an electrolytic cell during the electrolytic refining of copper can be used to reach a stable energy mode with minimum deviations in the process temperature.

Keywords: electrolytic refining of copper, cathode copper, digital thermal imager, IR imaging, nondestructive testing, digital twin

Acknowledgements: The study was carried out using the equipment of the Research Center "Processing problems of mineral and man-made resources" of St. Petersburg Mining University under the scientific direction "Energy-saving technologies".

For citation: Bazhin V. Yu., Nguyen Huy Hoang. Identification of electrode short circuits during the electrolytic refining of copper based on heat radiation. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):532-544. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-532-544>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не менее 90% производимой меди проходит стадию электролитического рафинирования³. Медь, полученная в результате огневого рафинирования, содержит значительное количество примесей (0,2–1,1%) и поэтому подвергается электролитическому рафинированию для получения меди высокой степени чистоты 99,999% и извлечения благородных металлов и других ценных элементов (селен, теллур и т.д.) из электродных шламовых осадков [1–6].

В работе рассматривается тип электролитических ячеек, где анод выполнен из меди после стадии огневого рафинирования [1], а катод состоит из тонких листов чистой меди. Электролитом служит водный раствор серной кислоты, температура электролита находится в интервале 55–65°C. При пропускании постоянного тока анод растворяется, а медь переходит в раствор и, очищенная от приме-

сей, осаждается на катодах. Примеси переходят в шламовый осадок и периодически удаляются в хранилище.

Во время работы электролизной ячейки возможны короткие замыкания в виде дендритных срастаний между электродами, которые приводят к резкому повышению температуры электролита, изменению его состава, разрушениям контактных участков электродов, изменению состава шламовых осадков, и, в целом, сбоям устойчивого энергообеспечения электролизной серии [6–8]. Контроль этих параметров в условиях производства проводится циклически при помощи визуального осмотра или с помощью ручных измерений. Время принятия решения для управления технологическим процессом, особенно при отклонении от установленных значений параметров, может составлять от 20 до 60 мин, что неизбежно приводит к значительным потерям электроэнергии. Актуальным пред-

³Баймаков Ю. В., Журин А. И. Электролиз в гидрометаллургии: учеб. пособ. М.: Изд-во «Металлургия», 1977. 336 с.

ставляется идентифицировать эти параметры и технологические нарушения при помощи специального средства измерения – цифрового тепловизора – для принятия своевременных управляющих воздействий через систему автоматизированного контроля электролизной серии.

Для проведения опытов использовали лабораторный стенд, состоящий из двух последовательно включенных в электрическую цепь ячеек. Схема имитационного стенда электролитического рафинирования показана на рис. 1. Электрический ток проходит от анодов через электролит к катодам, расположенным в левой ячейке. Между ячейками электрический ток проходит от катодов в левой ячейке к анодам в правой ячейке [7–10].

Приложенное к ячейке напряжение направляет ток от анода к катоду через электролит, транспортируя ионы меди Cu^{2+} от анода к катоду. Другие примеси в растворе электролита переходят в осадок на дно ванны. Электролиз для наращивания слоя катодной меди проходит от 10 до 30 дней вплоть до растворения анода на 80–85%. В наших исследованиях полностью готовые катоды удаляли из ванны через 7–15 дней после установки (замены). Схема процесса электролитического рафинирования меди для проведения опытов показана на рис. 2 [6].

Существует множество способов бесконтактного контроля замыканий между электродами [4–8] при помощи различных технических устройств, но в основном они связаны временной фиксацией самого нарушения. Разработанный способ идентификации при распознавании замыкания при помощи сканирующего цифрового тепловизора позволяет комплексно оценить площадь контакта, определить время начала замыкания, степень нагрева электродов в зоне короткого замыкания (КЗ), установить значения температур на всех участках, включая и температуру электролита во всем объеме ячейки.

При электролитическом рафинировании меди необходимо проводить регулярные осмотры ячейки для обнаружения КЗ между анодом и катодом. Несвоевременно обнаруженные короткие замыкания, кроме повышенного расхода электроэнергии, приводят к

изгибу контактных частей электродов с подводящей шиной, нарушению расстояния между электродами по всей длине электродов, резкому увеличению площади (наросту) дендритного срастания. При замыкании электродов ток проходит кратчайшее расстояние, и плотность тока на этих участках будет увеличиваться там, где расстояние между анодом и катодом наименьшее. Это означает, что медь будет расти быстрее в этих участках. Дендриты могут образовывать прочный мост между анодом и катодом, замыкая электроды. В случае КЗ ток выделяет тепло в короткозамкнутых электродах и в системе распределения тока вместо выработки меди. Особенно сильно нагреваются катодные стержни. Расход электроэнергии означает снижение эффективности по току. Короткие замыкания также приводят к получению медного катода, загрязненного примесями из-за отложений шлама на поверхности, и искривлению катода. КЗ должны быть устранены как можно скорее путем выпрямления погнувшихся выводов катода или разрыва погруженных медных дендритов.

На рис. 3 показана температура поверхности катодных стержней в данной ячейке. Катод пронумерован от 1 до 61 по горизонтальной оси. В нормальных условиях температура поверхности катодных стержней составляет 50–60°C, а короткозамкнутый катод имеет температуру около 90°C и более. Согласно рис. 3, в этой ячейке произошли три (катоды 9, 22, 47) серьезных КЗ, и одно приближается (катод 17).

При использовании разработанных ранее способов контроля [11–17] КЗ между анодом и катодом можно обнаружить путем измерения температуры поверхности катодов, датчиков напряжения между анодом и катодом или при изменении магнитного поля катодных стержней, создаваемого электрическим током. В этих случаях на производстве применяют ручные гауссметры или инфракрасные (ИК) сканеры, закрепленные к кран-балке внутри цеха. Такие системы в комплексе обеспечивают компьютеризированный мониторинг напряжения в ячейках по всей серии электролиза. Инфракрасные сканеры, переносимые краном, используются более двадцати лет

для проверки ванн на электролизных заводах, чтобы получить их тепловую карту, в которых можно легко обнаружить короткие замыкания. Также для проверки состояния ванны применяют ручные инфракрасные сканеры – компьютеризированный мониторинг напряжения на ванне для быстрого обнаружения КЗ, но они передают информацию только о текущем

состоянии ячейки, в которой произошло короткое замыкание. Для обнаружения короткозамкнутой анодно-катодной пары необходимо использовать другой (более совершенный) метод, когда накапливается информация о состоянии ячейки во время любого технологического отклонения.

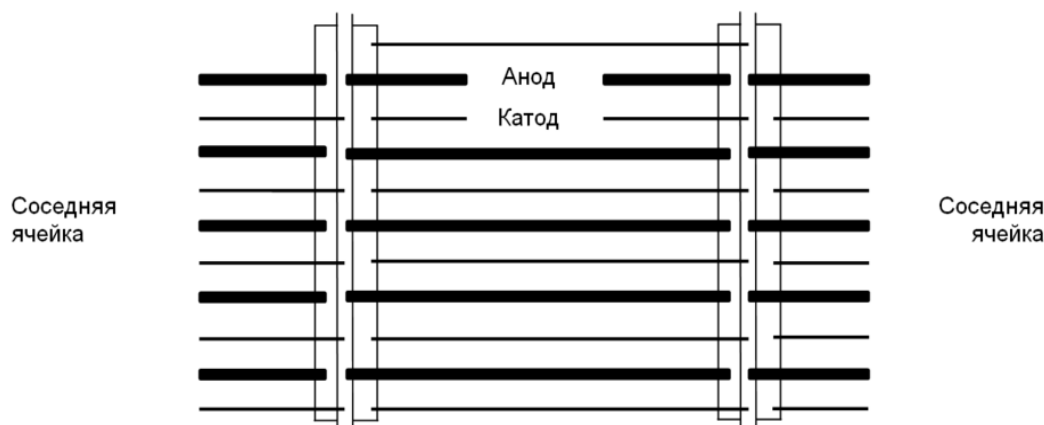


Рис. 1. Расположение электродов и схема электролитического рафинирования меди в ячейке лабораторного имитационного стенда

Fig. 1. Electrode location and a diagram of copper electrolytic refining in the cell of the laboratory test bench

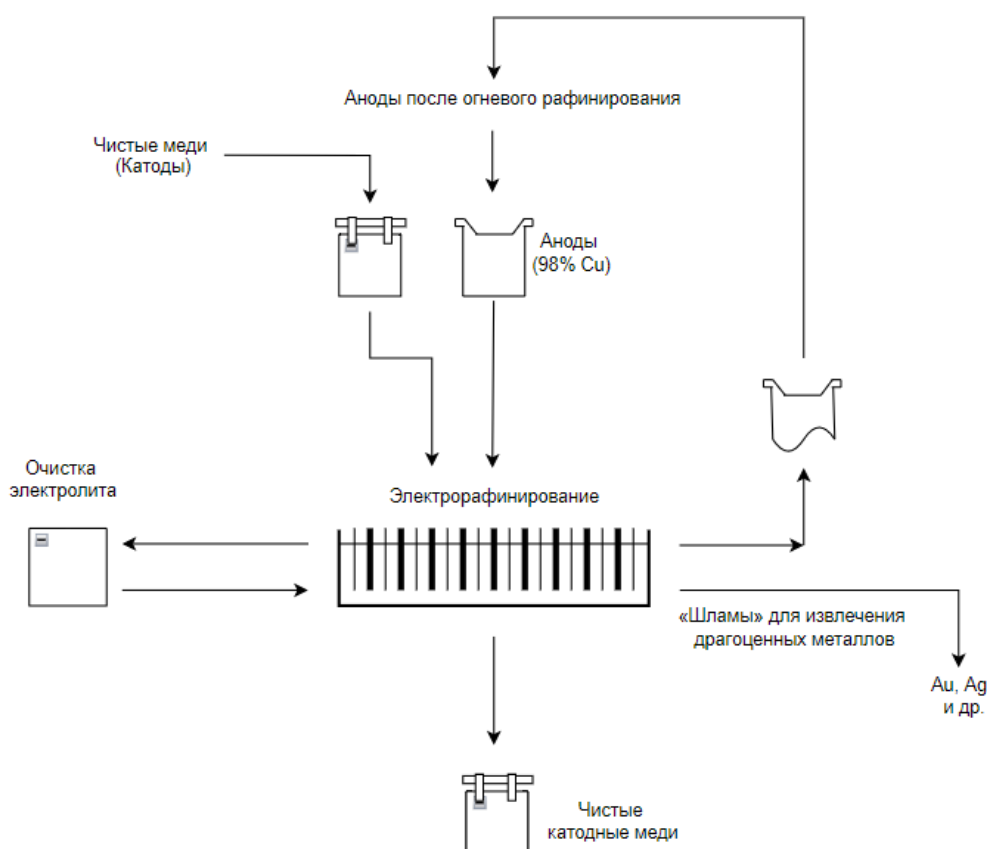


Рис. 2. Схема процесса электролитического рафинирования меди
Fig. 2. Diagram of copper electrolytic refining

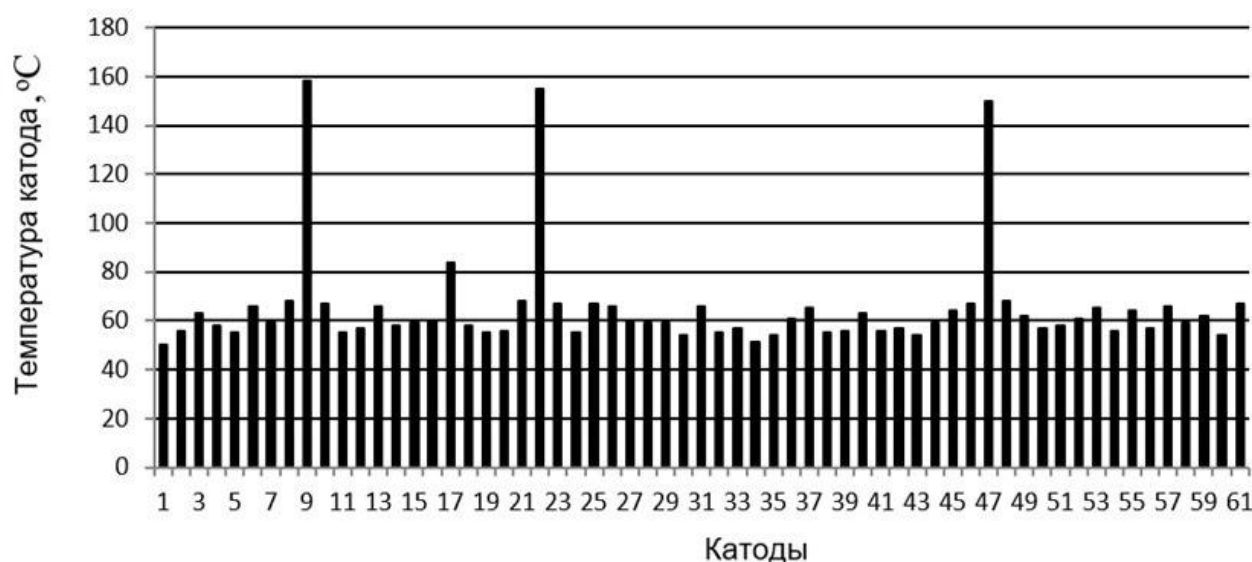


Рис. 3. Изменение температуры поверхности катодов в ячейке, зафиксированное при помощи тепловизора при сканировании

Fig. 3. Cathode surface temperature variation in a cell recorded by a thermal imager under scanning

Автоматически обнаружить короткие замыкания сложно, потому что они случайно появляются, и их размер и характеристики весьма разнообразны.

Цель исследования заключается в реализации способа идентификации технологического состояния электролитической ячейки во время КЗ при дендритном срастании между электродами при помощи сканирующего тепловизора. Предлагаемый способ основан на получении инфракрасного изображения электролизеров в режиме онлайн, получаемого тепловизором, и обработке текущих изображений. С помощью инфракрасного контроля можно снизить время обработки информации и принятия управляющего воздействия при регистрации технологического нарушения после обработки ИК-изображения, когда можно получить точные данные по времени образования, площади и местоположению короткозамкнутых катодов. Эксперименты, проведенные в ходе этого исследования, описаны в разделе 2 с использованием некоторых примеров изображений. В разделе 3 представлен разработанный алгоритм идентификации коротких замыканий по тепловому изображению. Результаты обсуждаются в разделе 4.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В эксперименте использовали тепловизоры (инфракрасные камеры) Optris и PI 400i/PI 450i, которые являются самыми компактными тепловизорами в своем классе. Обладая частотой измерения 80 Гц и оптическим разрешением 382x288 пикселей, устройства создают тепловые диаграммы в режиме реального времени с максимальной скоростью⁴.

Инфракрасная камера PI 450i при температурной чувствительности 40 мК наиболее подходит для определения минимальных перепадов температуры, что является неотъемлемой частью мероприятий по контролю качества продукции при обслуживании точной техники. Компактные и мощные ИК-камеры работают в диапазоне температуры от -20°C до 900°C, причем для модели Optris PI 400i выборочно диапазон может быть расширен от -20°C до 1500°C. В рамках выполнения работы было специально создано программное обеспечение для более обширного документирования и анализа тепловых диаграмм. Оно позволяет проводить термографический анализ в режиме реального времени и дистанционно управлять тепловизором, а также задействовать режим однострочной камеры. Получаемые тепловизион-

ные изображения использовались в качестве исходного материала при разработке и тестировании алгоритма обнаружения короткого замыкания на имитационной электролитической ячейке. Алгоритм был создан и протестирован с помощью программного обеспечения MATLAB при использовании функций Image Processing Toolbox MATLAB⁵.

Состояние электролитических ячеек было отсканировано с помощью ИК-камеры, установленной на мостовом кране. Инфракрасная камера размещалась примерно в 5,5 м от поверхности электродов. Результаты испытаний показаны на рис. 4. На этом тепловом изображении можно обнаружить одну точку короткого замыкания в виде цветных областей. На рис. 4 показано одно из преимуществ электролизеров с ИК-визуализацией, когда одновременно можно измерять несколько электролитических ячеек.

В качестве последнего шага ИК-камера была установлена на кране, и объектив камеры был направлен вниз на ячейки. Расстояние между объективом камеры и поверхностью ванн (ячеек) составляло 4,6 м. В ИК-камере использовался широкоугольный об-

ектив, поэтому вся ячейка помещалась в область изображения. На примерах изображений можно увидеть 61/61 катод. Цель этого эксперимента состояла в том, чтобы собрать материал для разработки алгоритма обнаружения и убедиться, что ИК-камера может быть размещена на кране. Мы протестировали использование кранов с камерами с разной скоростью, чтобы определить наиболее оптимальную скорость перемещения для последующего использования на заводе, необходимую для проверки всех ванн на серии. Один из результатов этих испытаний показан на рис. 5.

На рис. 5 показаны две ячейки. Они разделены линией распределения тока. Слева расположены сливные отверстия для электролита и осадка. В переливных стоках находится электролит (цветные участки), который имеет более высокую температуру по сравнению с температурой окружающей среды электролита и катодных пластин. По этой причине они видны на изображении. Катоды в нормальном состоянии можно обнаружить в виде черных линий. Видно, что присутствует одно короткое замыкание в середине нижней ячейки в виде красно-белых областей.

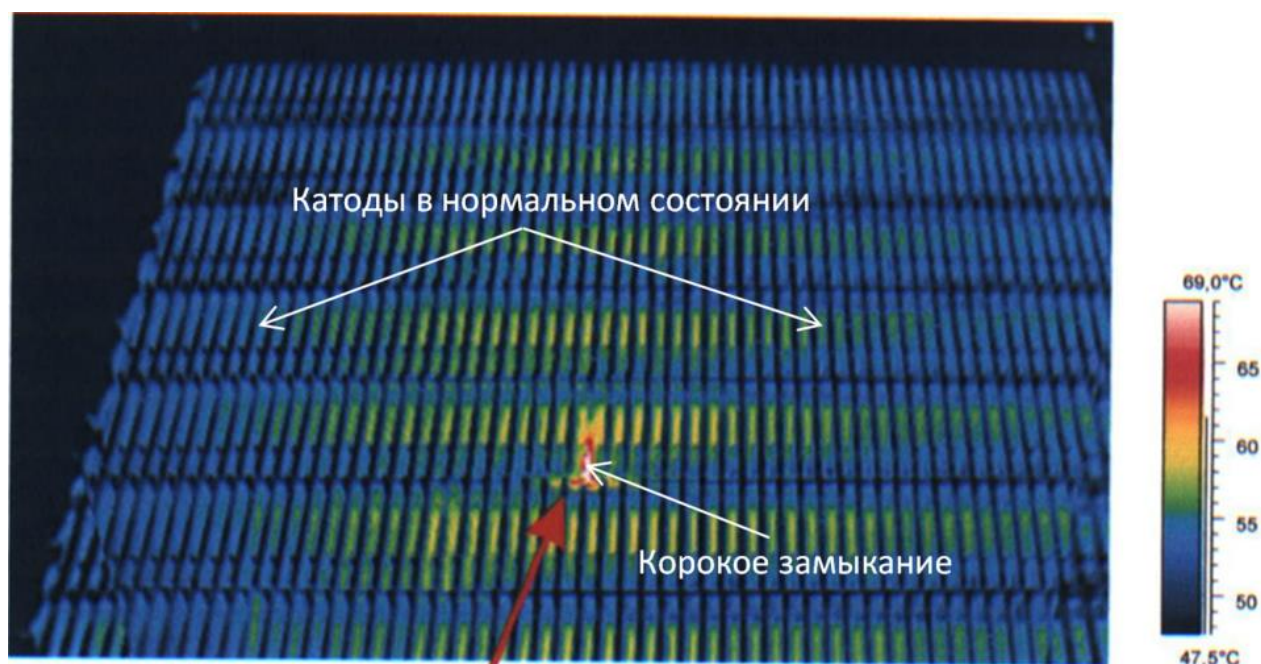


Рис. 4. Короткое замыкание (красно-белые области) в секции ячеек
Fig. 4. Short circuit (red and white areas) in the cell section

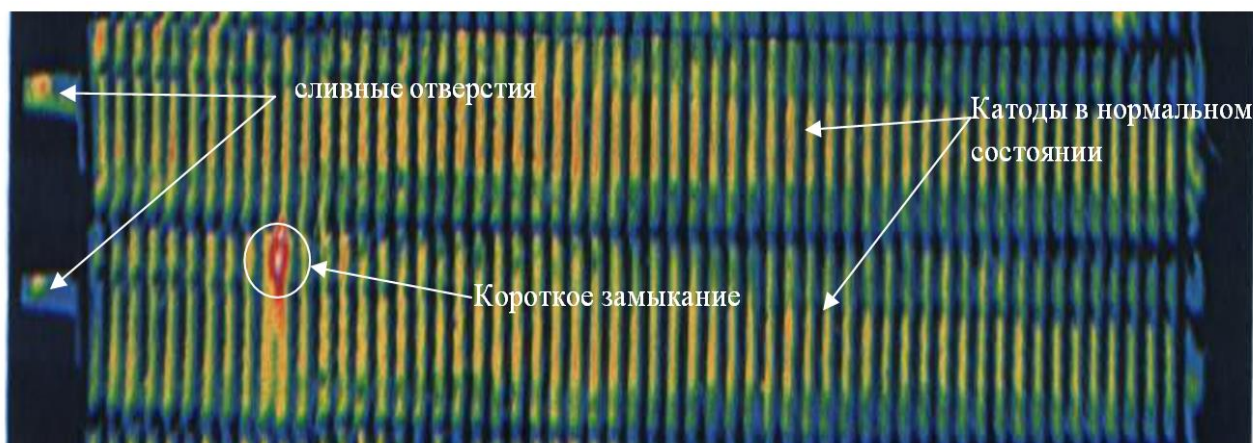


Рис. 5. Изображение ячейки, сканированное с мостового крана
Fig. 5. Cell image scanned from an overhead traveling crane

Изображения ячеек, выполненные тепловизором, наглядно показывают состояние ячеек и могут быть использованы для обнаружения короткого замыкания и общего состояния ячейки. Интерпретацию изображений можно выполнять и обрабатывать вручную или с помощью компьютера после сбора информации в базе данных (БД). В этом случае можно говорить о создании в автоматизированной системе управления технологическим процессом (АСУ ТП) цифрового двойника [18–24]. В разделе 3 представлен метод автоматизированной идентификации и интерпретации изображений с использованием обработки сканированных изображений.

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Чтобы автоматизировать процесс обнаружения и фиксации короткого замыкания с помощью тепловизора, изображение ячейки для проверки должно быть отмечено в момент реального времени, причем с самого начала его образования при дендритном срастании. Алгоритм обнаружения и идентификации по информационным признакам требует, чтобы ИК-изображение ячейки было зафиксировано при наведении камеры на объект и его контуры выше текущего распределителя (промежуточной шины), когда шина

находится между двумя ячейками. Причина такого захвата изображения, при котором отображаются две ячейки, состоит в том, что это облегчает поиск для создания адекватного алгоритма и сбор информации о состоянии ячейки гораздо легче идентифицировать по признакам (перегрев катода, повышение температуры электролита, площадь теплового контура при замыкании и т.д.). Ячейка должна быть расположена в поле общего изображения, прежде чем будут обнаружены места короткозамкнутых катодов для фиксирования времени начала и скорости роста площади, температуры электролита. Рис. 6 иллюстрирует пример необходимого времени для захвата изображения в режиме реального времени.

Алгоритм обнаружения включает в себя следующие три основных стадии:

1. Поиск исходных точек и линий для электролитической ячейки (от центральной оси до промежуточной переходной шины).
2. Месторасположение и нумерация катодов на общей матрице ячейки.
3. Поиск короткозамкнутых электродов с использованием порогов для последующей идентификации и причин образования замкнутых участков по результатам обработки данных изображения.

⁴Ульрих К. Инфракрасные термометры и инфракрасных камер // Optris RU. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.optris.ru/infrakrasnaja-kamera-optris-pi-640> (17.01.2022).

⁵Image Processing Toolbox // MathWorks. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/images/> (17.01.2022).

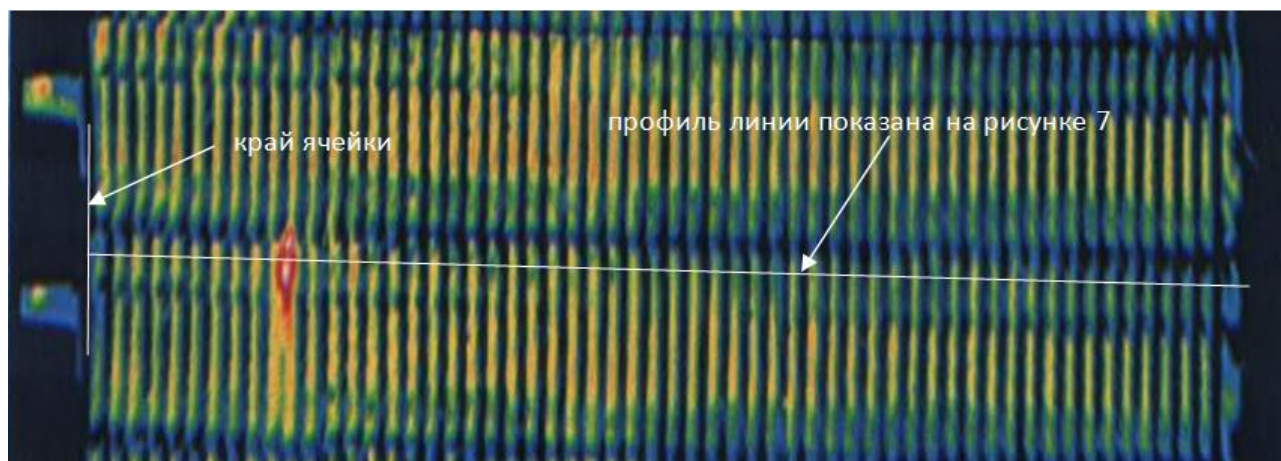


Рис. 6. Изображение ячейки, захваченное в режиме реального времени
Fig. 6. Cell image captured in the real-time mode

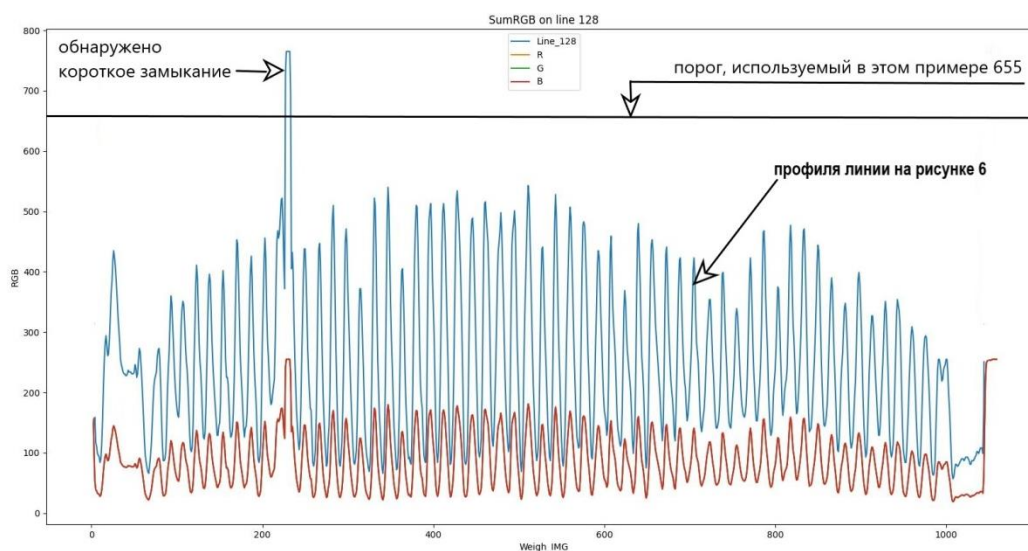


Рис. 7. Значения шкалы излучения и изменения цвета для профиля линии 6 во времени
Fig. 7. Values of the color emission and change scale for the line 6 profile in time

Прежде чем будут обнаружены какая-либо точка и площадь короткого замыкания, необходимо определить положение ячейки на изображении [25, 26]. Алгоритм использует геометрию ячейки для определения осевой линии ячейки. После того, как центральная линия ячейки будет позиционирована, текущая полоса распределения может быть обозначена далее с использованием верхней и нижней осевых линий ячейки. После фиксации текущего распределительного стержня определяется, что ячейка на тепловом изображении имеет вертикальную ориентацию. Чтобы расположить ячейку в горизонтальной ориентации, алгоритм пытается найти край

ячейки для последующей идентификации. После того как ячейка найдена на изображении, определяется положение катодов. При этом катоды нумеруются, начиная с конца ячейки, где расположен слив для перелива электролита. Поиск короткозамкнутых катодов осуществляется с помощью последовательных стадий. Примеры значений шкалы света для линии, отмеченной красно-белым цветом, показаны на рис. 6 и 7.

Алгоритм обнаружения КЗ был протестирован с различными типами тепловизионных изображений ячеек (ИК-характеристик) на имитационном лабораторном стенде с последующей адаптацией в реальных условиях

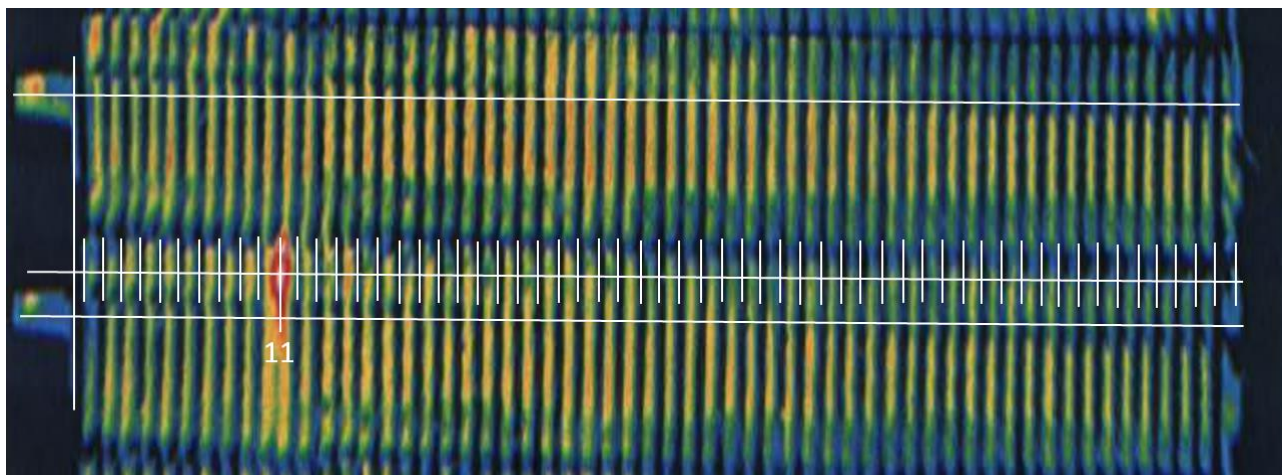


Рис. 8. Проверка ячейки с использованием алгоритма обнаружения и идентификации короткого замыкания
Fig. 8. Cell testing using short circuit identification algorithm

электролитического производства катодной меди. На рис. 8 показан результат, где светлыми линиями обозначаются целевые значения информационного потока, обнаруженные алгоритмом идентификации. В данном случае короткозамкнутые катодные участки имеют номера 11.

На многих электролизных установках элементы, как правило, покрыты пластиковым покрытием для удержания тепла, что затрудняет использование ИК-изображения для осмотра элементов. Обычно в этом случае расположение ячейки может быть выполнено успешно, но для поиска и нумерации короткозамкнутых катодов необходимо использовать расположение катодов по умолчанию. Пример изображения участка с нанесенным покрытием доказывает, что алгоритм обнаружения и идентификации успешно определил местоположение клетки и ее характеристики. В зоне перегрева температура поверхности электрода составила 160°C , а электролит в зоне максимального нагрева достиг температуры 92°C . Площадь замыкания составила $14\text{--}18\text{ см}^2$ (2,2% от всей контролируемой поверхности, которая увеличивалась со скоростью $2,4\text{ см}^2/\text{мин}$). Полученные данные переносятся в БД на третий уровень системы АСУ ТП для принятия решения о мгновенном разрушении сращения между электродами [27–30]. В данном случае в комплексе с тепловизором созданный объект контроля и идентификации состояния электролизной ячейки работает как цифровой

двойник, включая функции прогноза будущей технологической ситуации по полученным ранее данным.

В итоге через сканирующие тепловизоры этой системы можно обнаружить любые короткозамкнутые катоды и зафиксировать начало отклонения и скорость роста площади, а в нормальном состоянии – нет. Расположение катодов по умолчанию используется для определения количества короткозамкнутых катодов, и дает адекватный результат и для приведенных данных по измерению температуры электролита и площади самого замыкания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система контроля позволяет определить участки коротких замыканий между электродами и при помощи сканирующего цифрового тепловизора идентифицировать по признакам отклонение технологических параметров электролитической ячейки. Разработанная имитационная установка в виде цифрового двойника является более оптимальным методом прогнозирования и контроля коротких замыканий, использование которой эффективнее, чем применение ручных методов с термокраской в настоящее время.

В рамках проведения испытаний получены изменения параметров (роста площади и объема короткого замыкания между электродами), данные скорости роста температуры поверхности электрода и температуры электролита, ИК-характеристики на различных

стадиях процесса после замыкания электродов для идентификации параметров.

Полученные на лабораторном стенде результаты позволяют получить зависимости для обеспечения последующего управляю-

щего воздействия в рамках автоматизированной системы управления электролизной серии и устойчивого энергетического режима при минимизации удельного расхода электрической энергии на 1 т катодной меди.

Список источников

1. Булатов К. В., Жуков В. П. Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 421–433. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>.
2. Davenport W. G., King M., Schlesinger M., Biswas A. K. Extractive metallurgy of copper. London: Oxford, Pergamon, 2002. 452 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> (12.01.2022).
3. Антонов М. А. Метод порошковой металлургии для спекания изделий из медных порошков // Металлообработка. 2001. № 5. С. 48–49.
4. Selivanov E. N., Popov A. I., Selmenskikh N. I., Lebed A. B. Oxide inclusions in copper during its fire refining // Non-ferrous Metals. 2013. No. 2. P. 19–22.
5. Вольхин А. И., Елисеев Е. И., Жуков В. П., Смирнов Б. Н. Анодная и катодная медь: физико-химические и технологические основы. Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 2001. 431 с.
6. Левин А. И., Номберг Н. И. Электролитическое рафинирование меди. М.: Изд-во «Металлургия», 1963. 213 с.
7. Скрида О. И., Ладин Н. А., Дылько Г. Н. Определение оптимального состава электролита для электролитического рафинирования меди // Записки Горного института. 2005. Т. 165. С. 170–182.
8. Бажин В. Ю., Горленков Д. В., Нгуен Х., Никитина Л. Н. Реализация опыта цифровых автоматизированных систем управления электролитического рафинирования меди на предприятиях Вьетнама // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. P. 611–622. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-611-622>.
9. Пат. № 2455374, Российская Федерация, C25C 1/12. Способ получения высококачественной меди / В. Т. Дмитриев, Г. А. Боярских, С. В. Дмитриев, Э. В. Горшков. Заявл. 10.04.2008; опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19.
10. Пат. № 2597445, Российская Федерация, C22B 15/00, C22B 7/00. Способ получения нанопорошка меди из отходов / Е. В. Агеев, Н. М. Хорьякова, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеева, В. С. Малюхов; Заявл. 02.09.2014; опубл. 10.09.2016. Бюл. № 25.
11. Zeng Qingyu, Li Chun, Meng Yi, Tie Jun, Zhao Rentao, Zhang Zhifang. Analysis of interelectrode short-circuit current in industrial copper electrorefining cells // Measurement. 2020. Vol. 164. P. 108015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108015>.
12. Гронь Д. Н., Горенский Б. М. Информационно-управляющая система процессом электролитического рафинирования меди // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2009. Т. 2. № 3. С. 301–310.
13. Гронь Д. Н., Гронь Е. А., Кирякова О. В., Лапина Л. А., Жаринова Н. Ю. О применении системы поддержки принятия решений в гидрометаллургии меди // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 129–134. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22721> (12.01.2022).
14. Rudko V. A., Derkunsii I. O., Gabdulkhakov R. R., Konoplin R. R., Pyagay I. N. Kinetics of various hydrocarbon groups formation in distillates obtained during the production of needle coke via the delayed coking of decantoil // Egyptian Journal of Petroleum. 2022. Vol. 31. Iss. 1. P. 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2022.02.002>.
15. Pyagay I. N., Shaidulina A. A., Konoplin R. R., Artyushevskiy D. I., Gorshneva E. A., Sutyaginsky M. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as Al₂O₃-SiO₂ catalyst supports // Catalysts. 2022. Vol. 12. Iss. 2. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>.
16. Li Xin, Li Yonggang, Zhu Hongqiu, Wu Renchao, Zhou Can. Short circuit fault detection against high thermal background using a two-level scheme based on dog filter // Solving Engineering and Science Problems Using Complex Bio-inspired Computation Approaches. 2021. Vol. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8824768>.
17. Jia R. M., Ma X. L., He W. Q. Infrared short-circuit detection for electrolytic copper refining // International Conference on Advanced Electronic Science and Technology. 2016. P. 844. <https://doi.org/10.2991/aest-16.2016.113>.
18. Кадыров Э. Д. Комплексная автоматизированная система управления пирометаллургическим производством меди // Записки Горного Института. 2011. Т. 192. С. 120–124.
19. Xie Fengchun, Li Haiying, Ma Yang, Li Chunheng, Cai Tingting, Huang Zhiyuan, et al. The ultrasonically assisted metals recovery treatment of printed circuit board waste sludge by leaching separation // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 170. Iss. 1. P. 430–435. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.077>.
20. Sun Rui, Qin Gang, Li Gaibian, Hu Jinbao, Xiong Jingqi, Xu Huanwei. Abnormal conductive state identification of the copper rod in a nickel electrolysis procedure based on infrared image features and position characteris-

tics // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 7. P. 3691. <https://doi.org/10.3390/app12073691>.

21. Родниченко Е. К., Трифонова М. Е., Данилова А. А. Методы определения короткого замыкания при электролитическом рафинировании меди // World Science: Problems and Innovations: сб. ст. XLIX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 25 декабря 2020 г.). Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. С. 90–94.

22. Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Vol. 1. London: CRC Press, 2018. P. 3–16. <https://doi.org/10.1201/9780429461774>.

23. Litvinenko V. S., Leitchenkov G. L., Vasiliev N. I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. P. 125556. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>.

24. Goc K., Prendota W., Chlubny L., Strączek T., Tokarz W., Borowiak (Chachlowska) P., et al. Structure, morphology and electrical transport properties of the Ti3AlC2 materials // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Iss. 15. P. 18322–18328. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.045>.

25. Стреляев С. И. Фомичева О. А. Методы распознавания ИК-изображения // Известия Тульского государ-

ственного университета. Технические науки. 2018. № 11. С. 207–212.

26. Берг И. А., Поршнева С. В. Исследование методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела // Научная визуализация. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 37–52. <https://doi.org/10.26583/sv.12.2.04>.

27. Correa P., Cipriano A., Nuñez F., Salas J. C., Lobel H. Forecasting copper electrowinning cathode rejection by means of recurrent neural networks with attention mechanism // IEEE Access. 2021. No. 9. P. 79080–79088. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074780>.

28. Салтыкова С. Н., Доливо-Добровольская Г. И., Максимова А. В. Анализ данных по кристаллохимической природе фаз медно-никелевого фанштейна и бинарной системе Co–S // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 209.

29. Соз К. М., Руан Р., Цзя Я., Тан Ц., Ван Ч., Ши Ц. [и др.]. Влияние осаждения яроза на баланс железа при кучном биологическом выщелачивании на медном руднике Монива // Записки Горного института. 2021. Т. 247. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.11>.

30. Bazhin V. Yu., Nguyen H. H. Vietnamese metallurgy on the way out of the crisis with the use of automated control systems // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2467. P. 030018. <https://doi.org/10.1063/5.0092750>.

References

1. Bulatov K. V., Zhukov V. P. Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):421–433. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>.

2. Davenport W. G., King M., Schlesinger M., Biswas A. K. *Extractive metallurgy of copper*. London: Oxford, Pergamon; 2002, 452 p. Available from: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> [Accessed 12th January 2022].

3. Antonov M. A. Method of powder metallurgy for sintering products from copper powders. *Metalloobrabotka*. 2001;5:48–49. (In Russ.).

4. Selivanov E. N., Popov A. I., Selmenskikh N. I., Lebed A. B. Oxide inclusions in copper during its fire refining. *Non-ferrous Metals*. 2013;2:19–22.

5. Vol'hin A. I., Eliseev E. I., Zhukov V. P., Smirnov B. N. *Anode and cathode copper: physicochemical and technological fundamentals*. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo; 2001, 431 p. (In Russ.).

6. Levin A. I., Nomberg N. I. *Electrolytic refining of copper*. Moscow: Metallurgizdat; 1963, 213 p. (In Russ.).

7. Skirda O. I., Ladin N. A., Dyl'ko G. N. Determining electrolyte optimal composition for electrolytic refining of copper. *Zapiski Gornogo instituta*. 2005;165:170–171. (In Russ.).

8. Bazhin V. Yu., Gorlenkov D. V., Nguyen H., Nikitina L. N. Implementation of digital automated control systems

at electrolytic copper refining plants in Vietnam. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):611–622. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-611-622>.

9. Dmitriev V. T., Boyarskih G. A., Dmitriev S. V., Gorshkov E. V. *Production method of high-quality copper*. Patent RF, no. 2455374; 2012.

10. Ageev E. V., Hor'yakova N. M., Gvozdev A. E., Ageeva E. V., Malyuhov V. S. Production method of copper nanopowder from waste. Patent RF, no. 2597445; 2016.

11. Zeng Qingyu, Li Chun, Meng Yi, Tie Jun, Zhao Rentao, Zhang Zhifang. Analysis of interelectrode short-circuit current in industrial copper electrowinning cells. *Measurement*. 2020;164:108015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108015>.

12. Gron D. N., Gorensky B. M. Information-operating system process of electrolytic refinement of copper. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologiya = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2009;2(3):301–310. (In Russ.).

13. Gron' D. N., Gron' E. A., Kiryakova O. V., Lapina L. A., Zharinova N. Yu. About application of system decision support in hydrometallurgy copper. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015;2-2:129–134. Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22721> [Accessed 12th January 2022].

14. Rudko V. A., Derkunsii I. O., Gabdulkhakov R. R., Konoplin R. R., Pyagay I. N. Kinetics of various hydrocarbon groups formation in distillates obtained during the production of needle coke via the delayed coking of de-

cantoil. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2022;31(1):33-38. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2022.02.002>.

15. Pyagay I. N., Shaidulina A. A., Konoplin R. R., Artyushevskiy D. I., Gorshneva E. A., Sutyaginsky M. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ catalyst supports. *Catalysts*. 2022;12:2. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>.

16. Li Xin, Li Yonggang, Zhu Hongqiu, Wu Renchao, Zhou Can. Short circuit fault detection against high thermal background using a two-level scheme based on dog filter. *Solving Engineering and Science Problems using Complex Bio-inspired Computation Approaches*. 2021;2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8824768>.

17. Jia R. M., Ma X. L., He W. Q. Infrared short-circuit detection for electrolytic copper refining. In: *International Conference on Advanced Electronic Science and Technology*. 2016;844. <https://doi.org/10.2991/aest-16.2016.113>.

18. Kadyrov E. D. Integrated automated process control system of pyrometallurgical copper production. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2011;192:120-124. (In Russ.).

19. Xie Fengchun, Li Haiying, Ma Yang, Li Chuncheng, Cai Tingting, Huang Zhiyuan, et al. The ultrasonically assisted metals recovery treatment of printed circuit board waste sludge by leaching separation. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;170(1):430-435. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.077>.

20. Sun Rui, Qin Gang, Li Gaibian, Hu Jinbao, Xiong Jingqi, Xu Huanwei. Abnormal conductive state identification of the copper rod in a nickel electrolysis procedure based on infrared image features and position characteristics. *Applied Sciences*. 2022;12(7):3691. <https://doi.org/10.3390/app12073691>.

21. Rodnichenko E. K., Trifonova M. E., Danilova A. A. Methods for determining short circuit under electrolytic copper refining. In: *World Science: Problems and Innovations: sbornik statej XLIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = World Science: Problems and Innovations: Collected articles of the 49th International scientific and practical conference*. 25 December 2020, Penza. Penza: Nauka i Prosvesh-

chenie; 2020, p. 90-94. (In Russ.).

22. Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development. In: *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. Vol. 1. London: CRC Press; 2018, p. 3-16. <https://doi.org/10.1201/9780429461774>.

23. Litvinenko V. S., Leitchenkov G. L., Vasiliev N. I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling. *Geochemistry*. 2020;80(3):125556. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>.

24. Goc K., Prendota W., Chlubny L., Strączek T., Tokarz W., Borowiak (Chachlowska) P., et al. Structure, morphology and electrical transport properties of the Ti3AlC2 materials. *Ceramics International*. 2018;44(15):18322-18328. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.045>.

25. Strel'yaev S. I. Fomicheva O. A. IR picture recognition methods. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University*. 2018;11:207-212. (In Russ.).

26. Berg I. A., Porshnev S. V. Studying analysis methods of the burning torch infrared thermal images. *Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization*. 2020;12(2):37-52. <https://doi.org/10.26583/sv.12.2.04>.

27. Correa P., Cipriano A., Nuñez 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>.

28. Dolivo-Dobrovolskaya G. I., Saltikova S. N., Maksimova A. V. Analysis of data on crystallochemical nature of the phases of the copper-nickel matte and a binary system Co-S. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2013;202:209. (In Russ.).

29. Soe K. M., Ruan R., Jia Y., Tan Q., Wang Z., Shi J., et al. Influence of jarosite precipitation on iron balance in heap bioleaching at Monywa copper mine. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2021;247. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.11>.

30. Bazhin V. Yu., Nguyen H. H. Vietnamese metallurgy on the way out of the crisis with the use of automated control systems. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2467:030018. <https://doi.org/10.1063/5.0092750>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бажин Владимир Юрьевич,

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., 2, Россия

Нгуен Хю Хоанг,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., 2, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Yu. Bazhin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of
Automation of Technological Processes and Production,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Vasilievsky Island, Saint Petersburg 199106,
Russia

Huy Hoang Nguyen,

Postgraduate student,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Vasilievsky Island, Saint Petersburg 199106,
Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.05.2022; одобрена после рецензирования 09.06.2022; принята к публикации 20.09.2022.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 08.05.2022; approved after reviewing 09.06.2022; accepted for publication 20.09.2022.