



Научная статья

УДК 669.213.3:66.046.8

<http://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-611-622>

Реализация опыта цифровых автоматизированных систем управления электролитического рафинирования меди на предприятиях Вьетнама

Владимир Юрьевич Бажин^{1✉}, Денис Викторович Горленков²,
Хю Хоанг Нгуен³, Любовь Николаевна Никитина⁴

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

¹ bazhin-alfail@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

² denis.gorlenkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9632-6715>

³ huyhoangmta45@gmail.com

⁴ nikitina_ln@spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2603-8424>

Аннотация. Цель – разработка цифрового контроля и управления процессами электролитического рафинирования меди при решении вопросов повышения энергоэффективности. В качестве источника контроля технологического состояния электролитных ячеек предложено использовать сканирующие тепловизоры. При этом учитывался опыт работы систем автоматизации и контроля ОАО «Новгородский металлургический завод». Применялись математические методы исследований и стохастическая модель, разработанная на базе пакета MatLab. Данная модель используется на медеплавильном заводе Лаокай (Вьетнам). Предложен алгоритм, базирующийся на изменении значения температуры электролита в зависимости от степени нагрева катодного и анодного участков при дендритном замыкании, а также от времени нарушения процесса. Алгоритм разработан на языках программирования Visual BasicScript. Изменение степени нагрева участков замыкания фиксируется при помощи сканирующего тепловизора сразу же после изменения цвета поверхности катода. Установлена связь продолжительности времени короткого замыкания с количеством переходящего в осадок электролитной ячейки шлама. Шлам образуется после разрушения дендритного сращения и содержит благородные металлы. Разработанные мероприятия, наряду с переходом на цифровую обработку, необходимы для управляющего воздействия с учетом функциональных и кинетических зависимостей процесса рафинирования меди. Предлагаемые мероприятия и внедрение алгоритма контроля позволят внедрить системы удаленного доступа с элементами дополненной реальности при создании цифрового двойника, что позволит снизить удельный расход электроэнергии на 20–25% при уменьшении случаев замыканий электродов. Контроль состава и уровня электролита и шлама позволит снизить материальные потери и сохранить уровень концентрации благородных металлов в электролите. Для повышения качества управления автоматизацией электролитического производства катодной меди предложен ряд технических мероприятий, обеспечивающих ввод дополнительных точек контроля для расширения базы данных процесса. При этом снижается доля ручных периодических измерений технологических параметров.

Ключевые слова: автоматизация производства, цифровая трансформация, электролитическое рафинирование меди, катодная медь, информационные технологии

Для цитирования: Бажин В. Ю., Горленков Д. В., Нгуен Хю Хоанг, Никитина Л. Н. Реализация опыта цифровых автоматизированных систем управления электролитического рафинирования меди на предприятиях Вьетнама // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 611–622. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-611-622>.

Implementation of digital automated control systems at electrolytic copper refining plants in Vietnam

Vladimir Yu. Bazhin^{1✉}, Denis V. Gorlenkov², Huy H. Nguyen³, Lyubov N. Nikitina⁴

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

¹ bazhin-alfail@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

² denis.gorlenkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9632-6715>

³ huyhoangmta45@gmail.com

⁴ nikitina_ln@spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2603-8424>

Abstract. The work aims to develop digital control and management systems of copper electrolytic refining processes when addressing energy efficiency issues. Thermal imaging scanners can be used to monitor the process state of an electrolytic cell. In this regard, the experience in the automation and control systems of OJSC Novgorod Metallurgical Plant was considered. Mathematical research methods and a stochastic model developed in the MatLab software were used. This model was applied at the Lao Cai copper-smelting plant (Vietnam). The proposed algorithm is based on the temperature variation in electrolyte depending on the heating of cathode and anode sections during short circuits due to dendritic growth, as well as process disturbance time. The algorithm was developed using the Visual BasicScript programming languages. The temperature rise in short circuit areas was recorded using a thermal imaging scanner immediately after the colour change of the cathode surface. It was shown that the duration of a short circuit depends on the amount of sludge deposited in an electrolytic cell. The sludge formed following the destruction of intergrown dendrites contains precious metals. The developed measures, along with those of digitisation, are necessary for effective management, taking into account the functional and kinetic characteristics of the copper refining process. The proposed solutions and control algorithms will allow remote access systems with augmented reality elements when creating a digital twin. This will reduce the specific power consumption by 20–25% while decreasing the number of electrode short circuits. Controlling the composition and level of electrolyte and sludge will reduce material losses and maintain the concentration of noble metals in the electrolyte. To improve the control quality of automation during the electrolytic production of cathode copper, a number of technical measures were proposed that provide additional points of control to expand the process database. Furthermore, the proportion of manual periodic measurements of process parameters is reduced.

Keywords: production automation, digital transformation, electrolytic copper refining, cathode copper, information technologies

For citation: Bazhin V. Yu., Gorlenkov D. V., Nguyen Huu Hoang, 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>.

ВВЕДЕНИЕ

Медь – важный металл практически для любой отрасли промышленности как в развитых, так и в развивающихся странах. По потреблению медь занимает третье место среди металлов после стали и алюминия. Благодаря хорошей электропроводности, теплопроводности, высокой прочности медь и медные сплавы широко используются в качестве электрических проводников в промышленном и гражданском электрооборудовании. Кроме того, медь и медные сплавы также широко используются в оборонной промышленности, машиностроении, строительстве и других областях.

Электролитическое рафинирование меди позволяет получить практически чистый про-

дукт и является завершающим переделом медного производства. Медь, полученная в результате огневого рафинирования, так называемая «черновая медь», содержит еще значительное количество примесей (1–3%), и поэтому подвергается электролитическому рафинированию, цель которого – получение меди достаточно высокой степени чистоты (от 99,7 до 99,99% Cu) и извлечение из нее благородных металлов и других ценных примесей (селен, теллур и т.д.)^{5–7} [1–5].

Из меди, полученной при огневом рафинировании, отливают аноды, представляющие собой медные плиты с ушками-электрододержателями, которыми аноды опираются на бортовые шины или борта ванны при их размещении в ванне, ширина ано-

дов обычно достигает примерно 700–900 мм, длина – 1000 мм, толщина – 30–50 мм. Масса анодов на разных заводах колеблется от 160 до 320 кг.

Аноды помещают в электролитную ванну, а между ними расположены катоды, представляющие собой тонкие чистые листы меди толщиной 0,4–0,8 мм, полученные в специальных матричных ваннах, где катодами служат листы из чистой полированной меди, нержавеющей стали или титана. Катодные основы должны быть длиннее и шире анодов на 20–40 мм.

Аноды и катоды погружают в ванны, которые наполняются водным раствором сульфата меди со свободной серной кислотой и подключают к источнику постоянного тока. При прохождении электрического тока анод растворяется, а на катоде выделяется чистая медь [6–9].

МЕДНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ВЬЕТНАМА

В рудах медь входит в состав таких минералов, как халькопирит (CuFeS_2), борнит (Cu_5FeS_4), халькозин (Cu_2S), бурнонит (CuPbSbS_3). Также экономическое значение для промышленной переработки имеют такие минералы, как малахит $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$, азурит $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, куприт Cu_2O [10–13].

В странах азиатско-тихоокеанского региона большая часть медной руды имеет содержание меди около 2%, что представляет некоторые трудности для получения меди непосредственно из руд. Производство меди играет важную роль в экономике многих стран этого региона, поэтому решение вопросов добычи и дальнейшего получения меди представляет собой стратегическое значение.

На примере медных руд Вьетнама можно отметить, что в данном регионе медная руда относится к четырем различным типам происхождения: магматическому, гидротермаль-

ному, осадочному и метаморфическому.

Медные руды разбросаны по таким провинциям, как Лаокай, КаоБанг, ЛангШон, ШонЛа, КуангНинь, КуангНам, Дананг, КуангНгай, Лам Донг. Медные рудники в этих провинциях имеют небольшие запасы медной руды и разнообразный минеральный состав, в том числе сульфидные и карбонатные руды, но чаще всего встречаются халькопиритовые руды. Общие запасы разведанных рудников оцениваются примерно 600 000 т меди.

Важными месторождениями медных руд в Вьетнаме являются:

- месторождение Шинь Куен (провинция Лаокай);
- месторождение Бан Фук (провинция ШонЛа);
- месторождение Ван Шай (провинция ШонЛа);
- месторождение Бан Занг (провинция ШонЛа);
- месторождение Нунг Суой (провинция КуангНгай).

Кроме вышеперечисленных основных месторождений, еще есть многие другие месторождения, разбросанные по провинциям Тхань Хоа и ЛангШон.

Оценку распределения, запасов и качества медной руды можно дать на основе данных с двух крупнейших месторождений Вьетнама по ее добыче: Шинь Куен (провинция Лаокай) и Бан Фук (провинция ШонЛа).

Месторождение Шинь Куен считается смешанным рудным районом с тремя основными добываемыми компонентами: медью, редкоземельными элементами и золотом. В местных рудах медь обычно находится в виде сульфида (халькопирита). Месторождение было обнаружено и открыто в 1961–1973 гг. с оцененными запасами 52,7 млн т медной руды со средним содержанием меди в них от 0,5 до 11,58%, что эквивалентно 551,2 тыс. т меди вместе с 35 т золота и 25 т серебра.

⁵Худяков И. Ф., Тихонов А. И., Деев В. И., Набойченко С. С. Металлургия меди, никеля, кобальта: учеб. пособ. В 2 ч., ч. 1, 2. М.: Металлургия, 1977. 295 с.; 263 с.

⁶Гальдбек А. А., Шалыгин Л. М., Шмонин Ю. Б. Расчеты пирометаллургических процессов и аппаратов цветной металлургии. Челябинск: Металлургия, 1990. 448 с.

⁷Набойченко С. С., Юнь А. А. Расчеты гидрометаллургических процессов: учеб. пособ. для вузов. М.: Изд-во «МИСиС», 1995. 428 с.

Месторождение Бан Фук – это крупнейшее месторождение медно-никелевых минералов сульфидного типа в стране, расположенное в районе Та Кхоа (провинция ШонЛа). Этот район исследовался с 1959 по 1963 г. Руды находятся на высоте 100–520 м над уровнем моря. Общие запасы месторождения Бан Фук оцениваются в 3 млн т руды, при этом запасы металлов в руде составляют около 200 тыс. т меди и никеля.

На медном месторождении Шинь Куен было организовано совместное предприятие между компанией цветной металлургии ThaiNguyen и минеральной горнодобывающей компанией LaoCai (обе являются вьетнамскими) для разработки месторождения, добычи медной руды и с последующим производством медного концентрата с содержанием меди 18–20%. Данное совместное предприятие извлекло 615 000 т руды, что эквивалентно 9796 т металлической меди и составляет около 1,8% от общих запасов месторождения.

Это совместное предприятие было основано в 1982 г., но начало свою деятельность в 1994 г. В настоящее время ежегодно предприятие производит около 3 200 т концентрата со средним содержанием меди 18%. Предприятие небольшое и не имеет возможности для расширения производства и, соответственно, для увеличения производства медного концентрата. Таким образом, богатые медные руды добываются и перерабатываются исключительно для экспорта, а все внутреннее потребление меди Вьетнама обеспечивается импортом из других стран. В конце 2000 г. Вьетнамское правительство решило реализовать проект горно-металлургического комплекса (ГМК) по выпуску меди на севере страны (месторождение Шинь Куен), а в 2008 г. был построен первый медеплавильный завод Лаокай. Вся продукция реализовывается на внутреннем рынке Вьетнама. Работа ГМК Шинь Куен не только произвела прорыв для цветной металлургии во Вьетнаме, удовлетворив примерно 1/3 внутреннего потребления меди в промышленности и снизив годовой оборот

импорта меди, больше, чем на 40 млн долларов США, но и сделав важный вклад в экономическое развитие провинции Лаокай и страны в целом.

Медь – продукт стратегического назначения, способный существенно влиять на сектор реальной экономики. Практически все этапы производства меди нуждаются в усовершенствовании. Этап цифровизации во всех промышленных областях накладывает определенные задачи, которые необходимо решить для успешного перехода к цифровой экономике без потери качества конечного продукта, уменьшения воздействия на окружающую среду и ускорения процесса получения конечного продукта.

Сокращение выбросов с оборотными водами, утилизация или очистка электролита, доизвлечение ценных компонентов из водных растворов, снижение энергетической составляющей при производстве меди, получение меди из различных промпродуктов по-прежнему являются актуальными вопросами медной промышленности⁸ [14–16].

СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИ ВО ВЬЕТНАМЕ

Для переработки медного сырья на медеплавильном заводе Лаокай используется китайская технология [17]. После этого осуществляется процесс конвертирования полученного штейна с последующей плавкой, разливкой в аноды и заключительным процессом рафинирования для получения чистой меди.

Электролитическое рафинирование меди преследует две основные цели:

1) получение меди высокой чистоты (99,90–99,97%), удовлетворяющей требованиям электротехнической промышленности и производства чистых сплавов;

2) извлечение драгоценных и редких металлов, которые присутствуют в большинстве черновой меди.

Все затраты на электролитическое рафинирование меди чаще всего окупаются прибылью от последующей реализации извлекаемых благородных и редких металлов. Под-

⁸Samuelsson C., Björkman B. Copper recycling: handbook of recycling. Elsevier, 2014. P. 85–94.

лежащую электролитическому рафинированию черновую медь предварительно рафинируют огневым способом до достижения содержания меди 98,0–99,5%. Электролиз на всех медеэлектролитных заводах ведут в водном растворе сульфата меди, содержащем свободную серную кислоту. В результате разности потенциалов между электродами ванны происходит электрохимическое растворение меди на аноде и осаждение чистой меди на катоде. Большая часть примесей, содержащихся в анодной меди, осаждается на дне ванны в виде шлама, меньшая часть переходит в раствор, загрязняя электролит.

Примеси, содержащиеся в анодной меди, могут оказывать значительное влияние как на ход технологического процесса электролитического рафинирования меди, так и на качество катодного продукта. Примеси можно разбить на четыре группы:

1. Металлы более электроположительные, чем медь: золото, серебро, платина и ее спутники, селен, теллур и др.

2. Металлы, обладающие потенциалами, более близкими к потенциалу меди: мышьяк, сурьма, висмут.

3. Металлы, имеющие более электроотрицательные потенциалы, чем медь: свинец, олово, никель, кобальт, железо, цинк и др.

4. Различные химические соединения – пассивные в электрохимическом отношении вещества: Cu_2O , Cu_2S , Cu_2Se , Cu_2Te .

Для гидрометаллургического передела характерна работа с большим количеством промышленных растворов и на их оборот, содержащих ионы различных металлов, следует обращать особое внимание. Извлечение ионов металлов из промышленных сточных вод часто затруднено из-за сложного химического состава растворов и высоких затрат на рекуперацию, поскольку сточные воды, как правило, содержат лишь незначительные концентрации ценных металлов.

Использование методов химического осаждения для очистки оборотных растворов не всегда представляется возможным для некоторых предприятий, хотя данные методы наиболее распространены благодаря своей эффективности и невысокой стоимости. Но образование большого количества нераство-

римых осадков, например при использовании известняка, которые также необходимо утилизировать, заставляет искать новые методы очистки растворов.

Одним из таких методов может быть использование электроэнергии, особенно на предприятиях, использующих гидрометаллургический передел для получения медного продукта высокой чистоты. Но из-за низкого содержания ионов меди в оборотных растворах подобный метод может стать очень энергозатратным (при низкой концентрации меди лимитирующей стадией является диффузионная). Однако, с точки зрения экологии, данный метод «чистый» и одностадийный, к тому же не образует вторичных отходов.

В работе [18] было показано, что присутствие в промышленном растворе ионов железа предотвращает процесс электроочистки от чрезмерных энергозатрат благодаря протеканию отличной анодной реакции окисления железа вместо выделения кислорода.

Авторами работы [19] было показано, что присутствие кремния в анодном сплаве обеспечивает снижение потенциала растворения и, соответственно, и снижение энергозатрат на растворение анода.

Следует отметить, что для устойчивого получения меди высоких марок необходимы точные данные об источниках поступления примесей в катодную медь. Требуются сведения о вкладе отдельных механизмов и их интенсивности, в зависимости от величины и сочетания управляющих технологических параметров. Таким образом, для изучения механизма попадания примесей требуется сбор данных о ходе процесса и последующий глубокий анализ технологических процессов в целом. Необходима также разработка определенных средств и методов, которые позволили бы надлежащим образом воздействовать на механизмы включения примесей в катодный осадок.

После электролитического рафинирования полученный анодный шлам используют для извлечения благородных металлов. Печной газ, содержащий SO_2 , используется для производства серной кислоты.

Производство меди на вьетнамском медеплавильном заводе Лаокай включает сле-

дующие операции: подготовку руд к плавке; плавку на штейн; конвертирование штейна; плавку и разливку на аноды, электролитическое рафинирование меди.

Краткая технологическая схема может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

Основной проблемой является то, что технологический процесс на данном медеплавильном заводе во Вьетнаме сильно устарел, и уровень автоматизации находится на примитивном уровне. Это приводит к большому расходу сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, что существенно сказывается на конечной цене продукции. Это происходит даже несмотря на то, что электролитическое рафинирование меди имеет большой удельный расход электроэнергии, но из-за несовершенства контроля и управления основными параметрами процесса значительно затрудняется процесс развития медного производства в данном ре-

гионе, даже несмотря на наличие сырьевой базы. Сбор и анализ параметров с основных технологических узлов позволяет корректировать ведение любого технологического процесса, но на данном этапе развития автоматизации и работы с базами промышленных данных на медеплавильном заводе Лаокай это представляется проблематичным. Сбор информации о таких параметрах, как температура и состав электролита, межполюсное расстояние, содержание и уровень шламовых осадков в электролитной ячейке, говорит о том, что они являются функционально зависимыми друг от друга. Частота измерений параметров и сбор информации для управления системой автоматизированного управления представляет определенные трудности. Основной причиной энергетических потерь во время электролитического рафинирования меди являются короткие замыкания, вызванные нарастанием дендритов между электродами (срастание электродов).

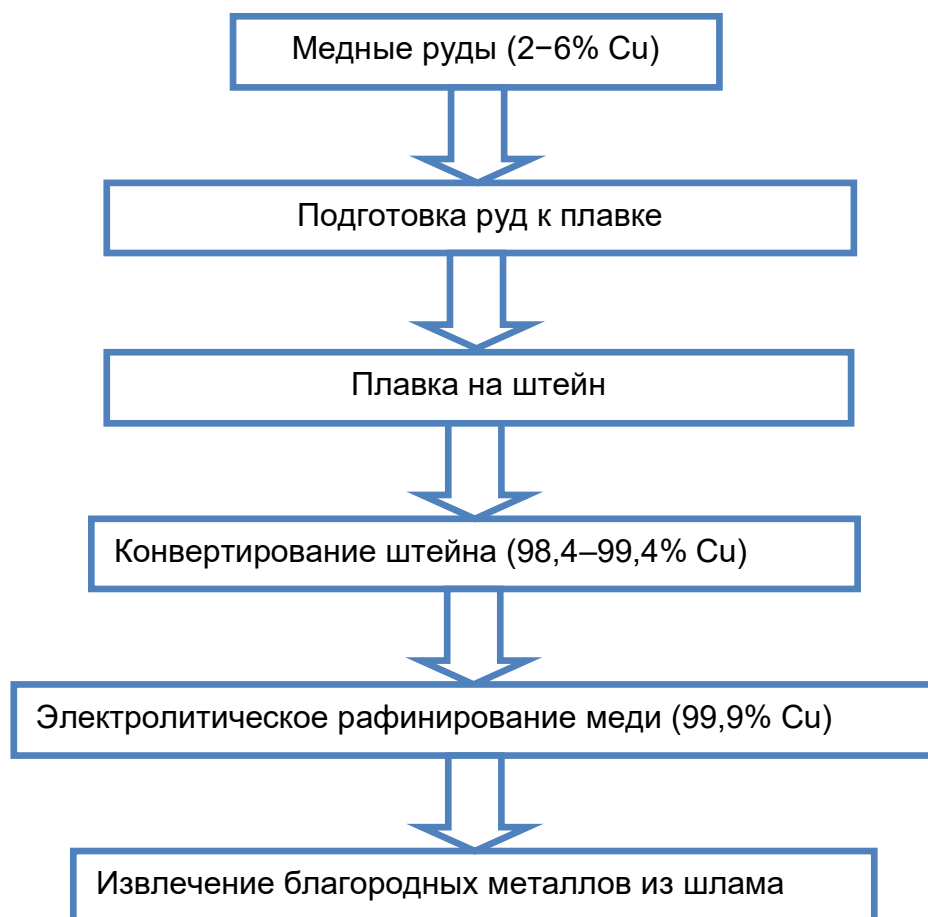


Рис. 1. Технологическая схема производства меди на медеплавильном заводе Лаокай
Fig. 1. Process flow diagram of copper production at Lao Cai copper smelting plant

Материальные потери связаны с образованием шлама в электролизной ванне и с нарушением баланса по драгоценным металлам, которые всегда присутствуют в производстве меди.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПРАКТИКА ПРОИЗВОДСТВА МЕДИ

В России на нескольких медных компаниях ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», АО «Русская медная компания» (РМК), ПАО «ГМК «Норильский никель» существуют, несмотря на типовое оборудование электролитических ячеек, различные подходы в управлении производством. Общей тенденцией является переход к цифровой трансформации и переход от локальных ручных аналоговых измерений к многофункциональному контролю и управлению при помощи нейронных систем [20].

Анализ производства может быть построен на математико-статистической обработке больших массивов данных по химическому составу технологически связанных продуктов электролиза. Для этого на предприятии должна быть отлаженная система накопления данных о составе основных технологических параметров, например: анодных плавок, катодных выгрузок, концентрации компонентов электролита, продолжительности анодных и катодных кампаний, данных о межполюсном расстоянии и других важных технологических показателях⁹. Часто все эти огромные массивы данных идентифицируются только на основе календарных сроков их получения. При этом может не учитываться, что, например, химические составы анодов и шламов, датированные одним и тем же числом, технологически совершенно не связаны друг с другом, поскольку шламы формировались из анодов, которые были загружены тремя неделями ранее, а аноды, которые попали в загрузку, были выплавлены еще раньше. В связи с этим, все данные должны быть специально подготовлены для синхронного представления с учетом времени.

Создание цифровой системы контроля основных параметров с вводом дополнительных точек контроля и сбора информации во время всего процесса электролитического рафинирования меди для быстрой оценки функциональных связей является актуальной задачей, которую возможно решить, используя опыт как отечественных, так и зарубежных предприятий.

В настоящее время существуют передовые практики и технологии, связанные с разработкой автоматизированных систем управления основных переделов получения меди из руды и переработки медного лома. Такие компании, как АО «Русская медная компания», ПАО «Норильский никель», «KazMinerals» (Казахстан), «Cuprum» (Чили) и другие, успешно используют разработки с учетом современных требований по цифровизации технологических процессов. Сотрудники института «Гипроникель», Санкт-Петербургского горного университета, Южно-Уральского технического университета принимают активное участие в разработке подобных технологий и их внедрении в действующие производства.

На современных предприятиях по производству меди из руд или по переработке медного лома необходимо учитывать непостоянную инфраструктуру, удаленность объектов и их многопрофильность. Вопросы, связанные с оптимизацией металлургических процессов, должны быть учтены при постановке задач комплексной автоматизированной системы управления. Все основные этапы переработки или производства меди неразрывно связаны и имеют свою специфику. Например, пирометаллургическое производство характеризуется высокими температурами и нелинейными технологическими процессами. Комплексная система управления должна увязывать воедино управление отдельными процессами и производствами. Система управления должна делать производственную картину структурированной, последовательной и функционально законченной [21].

⁹Спирин Н. А., Лавров В. В., Рыболовлев В. Ю., Гилева Л. Ю., Краснобаев А. В. [и др.]. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП: учеб. пособ. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014. 553 с.

На Надеждинском медеплавильном заводе (НМЗ) ПАО «ГМК Норильский Никель» в цехе электролиза меди внедрены передовые технологии. В отличие от других подобных производств электролизный цех НМЗ работает на самом минимальном межполюсном расстоянии. Благодаря этому электролизные ванны имеют высокие выход по току и производительность при минимальном расходе электроэнергии (рис. 2). Интенсифицировать

процесс за счет повышения анодной плотности тока позволяет высокое техническое оснащение процесса. Контроль за возникновением коротких замыканий между электродами осуществляется при помощи сканеров-тепловизоров (рис. 3). Специальная прикладная программа считывает данные температурных отклонений и выдает сигнал оператору.

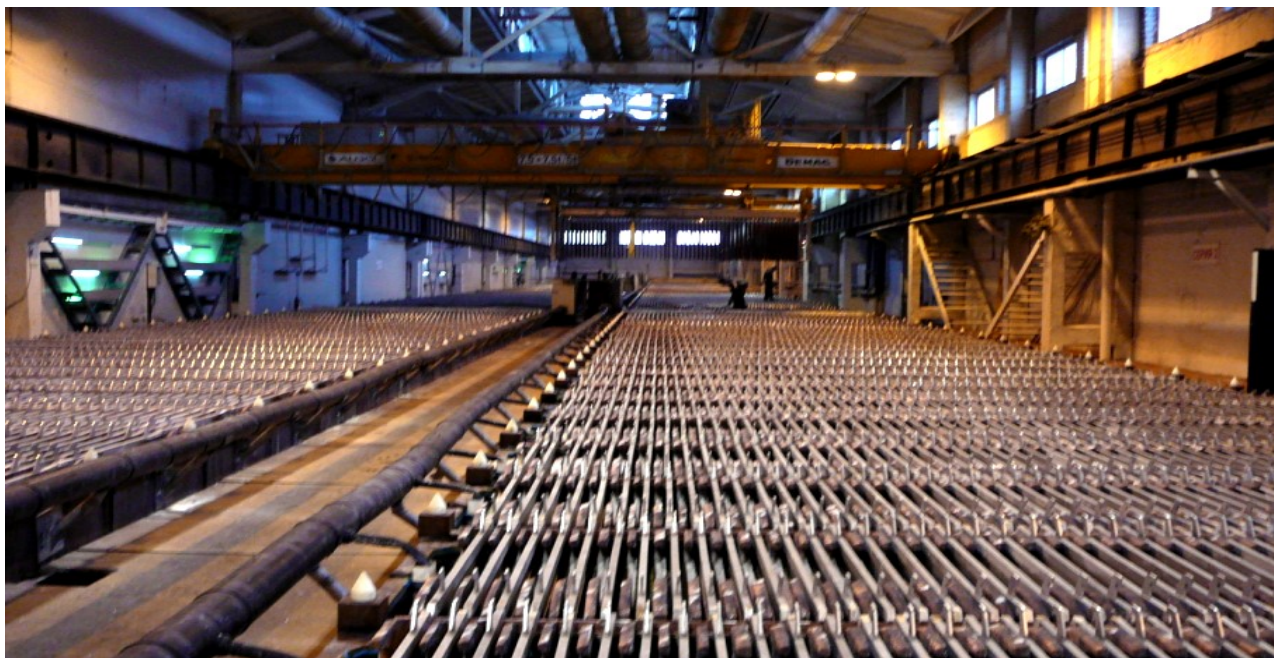
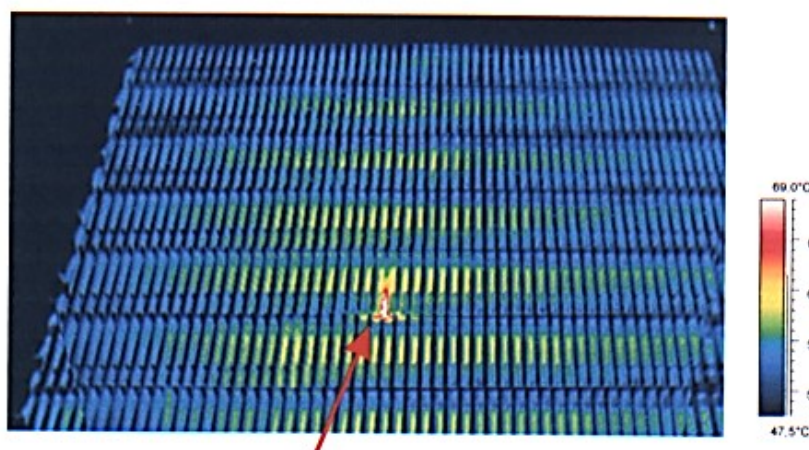


Рис. 2. Электролизный цех на Надеждинском металлургическом заводе
Fig. 2. Electrolysis shop at Nadezhdinsky metallurgical plant



Короткозамкнутая пара электродов

Рис. 3. Термограмма контроля температуры поверхности электродов при помощи тепловизора
Fig. 3. Thermogram for electrode surface temperature control using a thermal imager

На предприятиях АО «Русская медная компания» реализуется проект «умная медь», который представляет собой стандарт организации производства, который РМК внедряет на своих предприятиях. Согласно этому стандарту, производство должно соответствовать высоким требованиям к качеству продукции, охране окружающей среды и оставаться ответственным с точки зрения развития территорий присутствия, на которых располагаются предприятия РМК.

«Умная медь» – это не только промышленный стандарт, но и сформулированная в результате плотного и продуктивного взаимодействия с крупнейшими мировыми производителями высокотехнологичной техники – «Outotec», «Metso Minerals», «Komatsu», «Atlas Copco» – философия бизнеса компании, которая показала свою эффективность. Такой опыт может быть полезен при реорганизации устаревших предприятий развивающихся стран.

Не только решение вопросов автоматизации способно оптимизировать современные производства. Совершенствование технологии переработки медного лома может значительно снизить энергопотребление производства, что может оказаться определяющим фактором при выборе той или иной технологии для стран с дефицитом электроэнергии. Например, в работах [22, 23] показано, что добавление оксида кремния при плавке с разливкой анодов дает увеличение скорости растворения за счет уменьшения пассивации анодов и снижения расхода электроэнергии. А при переработке медного лома, содержащего благородные металлы, возможно ис-

пользование разделения катодного и анодного пространства диафрагмами, а также применение хлорсодержащего электролита, что дает значительное уменьшение потерь благородных металлов и увеличение скорости растворения анодов. Такое решение существенным образом уменьшает энергетическую нагрузку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день можно сказать, что в Азиатско-Тихоокеанском регионе, и особенно во Вьетнаме, развитие промышленного производства быстро набирает темп. В стране практически во всех отраслях тяжелой и добывающей промышленности наблюдается внедрение инновационных технологических процессов. Использование автоматизированной системы управления или внедрение технологий с учетом требований «Индустрии 4.0» в практике работы металлургических предприятий является одним из важнейших факторов повышения эффективности технико-экономических показателей. Такой подход позволяет предприятию повысить эффективность производства, перейти на новый уровень качества продукции, сократить трудовые и иные затраты, повысить уровень безопасности на производстве.

В этой связи для решения существующих проблем необходимо создать систему автоматизированного управления металлургическим производством, позволяющую инженерно-технологическому персоналу оперативно осуществлять управление и контроль производства медеплавильного завода.

Список источников

1. Davenport W. G., King M. J., Schlesinger M. E., 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> (12.06.2021).
2. Антонов М. А. Метод порошковой металлургии для спекания изделий из медных порошков // Металлообработка. 2001. № 5. С. 48–49.
3. 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.
4. 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.
5. Левин А. И., Номберг Н. И. Электролитическое рафинирование меди. М.: Металлургиздат, 1963. 213 с.
6. Скирда О. И., Ладин Н. А., Дылько Г. Н. Определение оптимального состава электролита для электролитического рафинирования меди // Записки Горного института. 2005. Т. 165. С. 170–171.
7. Гронь Д. Н., Горенский Б. М. Информационно-управляющая система процессом электролитического рафинирования меди // Журнал Сибирского феде-

рального университета. Техника и технологии. 2009. Т. 2. № 3. С. 301–310.

8. Гронь Д. Н., Любанова А. Ш., Ченцов С. В. Повышение эффективности управления процессом электролитического рафинирования меди с помощью СППР // Фундаментальные исследования. 2013. № 8-4. С. 822–827. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32003> (09.06.2021).

9. Мансурова О. К., Читкова Я. В. Контроль и управление межэлектродным расстоянием при электролитическом рафинировании меди // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 5 июня 2019 г.). Пенза: Изд-во «Наука и Просвещение», 2019. Ч. 2. С. 268–272.

10. Гавриленко А. Н., Старых Р. В., Хабибуллин И. Х., Матухин В. Л. Метод ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ в локальном поле в исследовании рудных медных концентратов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 9. С. 31–35.

11. Молошаг В. П., Колотов С. В., Гуляева Т. Я. Новые данные о сульфидах меди и серебра в рудах колчеданных месторождений Урала // Уральский минералогический сборник. 1995. № 5. С. 223–231.

12. Дистлер В. В., Крячко М. А., Юдовская В. В. Условия образования оруденения платиновых металлов в хромитовых рудах Кемпирсайского рудного поля // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 1. С. 44–74.

13. Степанов В. А., Гвоздев В. И., Трухин Ю. П., Кунгурова В. Е., Молчанова Г. Б. Минералы благородных и редких металлов в рудах Шанучского медно-никелевого месторождения (Камчатка) // Записки Российского минералогического общества. 2010. Т. 139. № 2. С. 43–58.

14. 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>.

15. Жмурова В. В., Немчинова Н. В., Васильев А. А. Гидрохимическая очистка от меди и свинца

золотосодержащих катодных осадков // Цветные металлы. 2019. № 8. С. 64–74.

<https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>.

16. Schipper B. W., Lin H.-C., Meloni M. A., Wansleeben K., Heijungs R., Van der Voet E. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics // Resources, Conservation & Recycling. 2018. Vol. 132. P. 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.004>.

17. Мазырин В. М. Экономика Вьетнама на подъеме: тенденции 2013–2014 г. // Вьетнамские исследования. 2015. № 5. С. 182–207.

18. Hannula P.-M., Khalid M. K., Janas D., Yliniemi K., Lundström M. Energy efficient copper electrowinning and direct deposition on carbon nanotube film from industrial wastewaters // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 207. P. 1033–1039. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.097>.

19. Alexandrova T. A., Gorlenkov D. V., Romanova N. A. Researching of influence of tungsten, silicon and impurities oxidation on electrolytic dissolution of Cu-Zn and Fe-Ni-Co anodes // Periódico Tchê Química. 2017. Vol. 14. No. 28. P. 9–17.

20. Шаламов А. В., Мазеин П. Г. Нейронные сети как новый подход к управлению технологическим оборудованием // Известия Челябинского научного центра. 2003. Вып. 1. С. 60–64.

21. Кадыров Э. Д. Комплексная автоматизированная система управления пирометаллургическим производством меди // Записки Горного Института. 2011. Т. 192. С. 120–124.

22. Пат. 2357012, Российская Федерация, С1, С25С 1/20 (2006.01). Способ извлечения благородных металлов из отходов радиоэлектронной промышленности / В. С. Литвиненко, Н. М. Теляков, Д. В. Горленков; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова. Заявл. 25.12.2007; опубл. 27.05.2009. Бюл. № 15.

23. Пат. 2553320, Российская Федерация, С1, С25С 1/20 (2006.01). Способ извлечения благородных металлов из отходов радиоэлектронной промышленности / А. Н. Теляков, Д. В. Горленков, Т. А. Александрова, Д. В. Шмидт, А. И. Закирова; заявитель и патентообладатель Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Заявл. 27.03.2014; опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16.

References

1. Davenport W. G., King M. J., Schlesinger M. E., 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 June 2020].

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

3. 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.

4. 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.).

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

6. 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.).

7. 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.).

8. Gron' D. N., Lyubanova A. Sh., Chencov S. V. Improved management of the process of electrolytic refining of copper with the help of decision support systems. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013;8-4:822-827. Available from: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32003> [Accessed 9th June 2020]. (In Russ.).

9. Mansurova O. K., Chitkova Ya. V. Control and management of interelectrode distance in electrolytic copper refining. *Sovremennaya nauka: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii: sbornik statej VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern science: relevant issues, achievements and innovations: collected articles of VII International scientific and practical conference*. 5 June 2019, Penza. Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2019, vol. 2, p. 268-272. (In Russ.).

10. Gavrilenko A. N., Staryh R. V., Habibullin I. H., Matuhin V. L. ^{63,65}Cu NMR method in the local field when studying ore copper concentrates. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika = Russian Physics Journal*. 2014;57(9):31-35. (In Russ.).

11. Moloshag V. P., Kolotov S. V., Gulyaeva T. Ya. New data on copper and silver sulfides in ores of the Urals pyrite deposits. *Ural'skij mineralogicheskij sbornik*. 1995;5:223-231. (In Russ.).

12. Distler V. V., Kryachko M. A., Yudovskaya V. V. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field. *Geologiya rudnyh mestorozhdenij*. 2003;45(1):44-74. (In Russ.).

13. Stepanov V. A., Gvozdev V. I., Truhin Yu. P., Kungurova V. E., Molchanova G. B. Minerals of precious and rare metals in ores of Shanuchskoye copper-nickel deposit (Kamchatka). *Zapiski Rossijskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2010;139(2):43-58. (In Russ.).

14. 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>.

15. Zhmurova V. V., Nemchinova N. V., Vasiliev A. A. Removal of copper and lead from gold-bearing cathode deposits by hydrochemical treatment. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:67-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>.

16. Schipper B. W., Lin H.-C., Meloni M. A., Wansleeben K., Heijungs R., Van der Voet E. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics. *Resources, Conservation & Recycling*. 2018;132:28-36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.004>.

17. Mazyrin V. M. Vietnam's economy is on the rise: trends of 2013-2014. *V'etnamskie issledovaniya*. 2015;5:182-207.

18. Hannula P.-M., Khalid M. K., Janas D., Yliniemi K., Lundström M. Energy efficient copper electrowinning and direct deposition on carbon nanotube film from industrial wastewaters. *Journal of Cleaner Production*. 2019;207:1033-1039. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.097>.

19. Alexandrova T. A., Gorlenkov D. V., Romanova N. A. Researching of influence of tungsten, silicon and impurities oxidation on electrolytic dissolution of Cu-Zn and Fe-Ni-CO anodes. *Periódico Tchê Química*. 2017;14(28):9-17.

20. Shalamov A. V., Mazein P. G. Neural networks as a new approach to technological equipment control. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra*. 2003;1:60-64. (In Russ.).

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

22. Litvinenko V. S., Telyakov N. M., Gorlenkov D. V. *Extraction method of noble metals from radio-electronic industry waste*. Patent RF, no. 2357012; 2009. (In Russ.).

23. Telyakov A. N., Gorlenkov D. V., Aleksandrova T. A., Shmidt D. V., Zakirova A. I. *Extraction method of noble metals from radio-electronic industry waste*. Patent RF, no. 2553320; 2015. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бажин Владимир Юрьевич,

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

Горленков Денис Викторович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
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.), Associate Professor,
Head of the Department of
Automation of Technological Processes and Production,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Saint Petersburg 199106, Russia

Denis V. Gorlenkov,

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

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

Huu Hoang Nguyen,
Postgraduate Student,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Saint Petersburg 199106, Russia

Никитина Любовь Николаевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Lyubov N. Nikitina,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of
Automation of Technological Processes and Production,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Saint Petersburg 199106, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.07.2021; одобрена после рецензирования 02.09.2021; принята к публикации 21.10.2021.

Information about the article

The article was submitted 18.07.2021; approved after reviewing 02.09.2021; accepted for publication 21.10.2021.