



Сбор и обработка данных алюминиевого электролизера с использованием многофункционального пробойного устройства и системы технического зрения

УДК [669.713.72+331.453]:[681.5.08+004.896]



П. А. Петров,
декан факультета переработки
минерального сырья,
канд. техн. наук,
эл. почта: Petrov_PA3@pers.spmi.ru



А. К. Шестаков,
аспирант кафедры автоматизации
технологических процессов и производств
(АТПП),
эл. почта: s195017@stud.spmi.ru



М. Ю. Николаев,
магистрант кафедры АТПП,
эл. почта: s212364@stud.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Алюминиевая промышленность в России занимает лидирующую позицию по уровню производства и потребления продукции в цветной металлургии, имеет стратегическое значение для развития экономики страны [1, 2]. Принятые планы развития отрасли предусматривают ежегодное увеличение объемов выпускаемого алюминия-сырца, связанное с ростом потребления алюминия в машиностроительной отрасли, а также с новыми научными открытиями в материаловедении [3–5], что приводит к использованию сплавов на основе алюминия в новых областях промышленности [6–8]. Увеличение выпуска первичного алюминия требует модернизации технологических процессов, повышения эффективности производства [9–11]. Однако тяжелые условия процесса электролиза криолит-глиноземной расплава (высокая температура электролита — 960 °С, изменяющееся магнитное поле (МГД-нестабильность), пыление глинозема (Al_2O_3), выделение в процессе электролиза перфторуглеродов (ПФУ), твердых фторидов, плавиковой кислоты, смолистых веществ [12, 13]) ограничивают применение дополнительных средств автоматизации, датчиков [14–16], позволяющих осуществлять мониторинг технологического процесса в целях

Системы управления процессом выпуска алюминия, получившие наибольшее распространение на производстве, не обеспечивают своевременный контроль и регулирование основных технологических параметров электролиза (температуры электролита, концентрации глинозема, криолитового отношения, уровня металла и электролита). Эти параметры измеряют вручную и с большим интервалом (1 раз в сутки). Сложность внедрения автоматических систем контроля заключается в невозможности использования большинства датчиков и технических решений из-за тяжелых условий процесса электролиза (высокая температура, выделение вредных газов, пыление глинозема, переменное магнитное поле). В статье предложено решение, позволяющее осуществлять сбор значений уровня электролита в автоматическом режиме без необходимости разгерметизации ванны во время измерения при помощи лазерного дальномера, установленного внутри цилиндра пробойного устройства автоматической подачи глинозема (АПГ). Зная уровень электролита на каждом цикле питания, возможно определять минимальную порцию глинозема (интервал питания АПГ), а также добавлять дробленый электролит в автоматическом режиме (при наличии бункера с автоматической подачей дробленого электролита). Разработанная для обнаружения видимых выбросов вредных веществ система технического зрения на основе нейронной сети позволяет в случае нарушения сплошности криолит-глиноземной корки или разгерметизации ванны оперативно восстановить покрытие электролизера.

Ключевые слова: электролиз алюминия, контроль уровня электролита, лазерный дальномер, автоматическая подача глинозема, TensorFlow, машинное обучение, сверточная нейронная сеть, распознавание объектов, компьютерное зрение, выбросы загрязняющих веществ.

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.06

повышения его эффективности [17–19]. По этой причине контроль основных технологических параметров: температуры электролита, уровня электролита и металла, криолитового отношения (КО), формы рабочего пространства электролизной ванны осуществляется работниками электролизного цеха (ЭЦ) вручную минимум 1 раз в сутки посредством разгерметизации электролизной ванны (снятия боковых створок электролизера). Это нарушает тепловой режим ванны, вредные вещества попадают в атмосферу ЭЦ, минуя систему сухой газоочистки. Таким образом, системы управления процессом получения алюминия, получившие наибольшее распространение в производстве, не обеспечивают своевременный контроль и регулирование основных технологических параметров электролиза [20].

Этот факт подтвержден в работах профильных специалистов: «В алюминиевой промышленности существует проблема низкой адекватности измерительных комплексов, используемых для определения уровней металла и электролита на действующих электролизерах» [21].

Компании-производители первичного алюминия разрабатывают различные технические решения для автоматизации сбора основных технологических параметров, но к настоящему времени проблема не решена. Канадской компанией STAS, производящей оборудование для алюминиевых заводов, создан мобильный измерительный комплекс STARprobe™, позволяющий с высокой точностью измерять температуру криолит-глиноземного расплава, концентрацию глинозема и КО [22–24]. Однако такой мобильный комплекс лишь облегчает проведение измерений технологических параметров вручную, а не выполняет роль автоматической системы контроля.

Уровень электролита влияет на частоту наступления анодного эффекта, при котором происходит выброс ПФУ и резкое повышение напряжения на аноде [25–27]. При низких значениях уровня электролита загружаемая системой автоматической подачи глинозема (АПГ) порция Al_2O_3 не успевает раствориться и выпадает в осадок на подину электролизной ванны. Это приводит к снижению концентрации глинозема в расплаве, является основной причиной возникновения анодного эффекта и снижения выхода по току [28–30]. При высоких значениях уровня электролита и постоянной частоте питания системы АПГ концентрация глинозема снижается, что вызывает возникновение анодного эффекта. Кроме того, уровень электролита изменяется вследствие его выпаривания. Таким образом, для снижения вероятности возникновения анодного эффекта необходимо поддерживать определенную высоту слоя электролита (с учетом постоянно меняющегося уровня металла при работе алюминия и его выливки) для каждого типа электролизера. Помимо этого, для получения лучших показателей выхода по току требуется работать на минимальных значениях КО (2,2–2,4), не приводящих к возникновению анодного эффекта [21].

Одним из технологических параметров, который также подлежит контролю, является загрязненность воздуха в ЭЦ [31, 32]. Широкое применение систем сухой газоочистки позволило добиться значительного повышения качества фильтрации отходящих газов, выделяющихся в результате процесса электролиза криолит-глиноземного расплава, а также улучшить качество воздуха в ЭЦ [31, 33, 34]. Однако существуют нештатные ситуации, когда вредные вещества (ПФУ, твердые фториды, смолистые вещества, плавиковая кислота) попадают в атмосферу ЭЦ по причине разгерметизации электролизера (например, при снятой боковой створке укрытия электролизера после его обслуживания),

при нарушении сплошности криолит-глиноземной корки, возникновении длительного анодного эффекта или в результате отклонения в работе системы сухой газоочистки. Выбросы вредных веществ сопровождаются видимым облаком. Такие ситуации требуют немедленного вмешательства персонала ЭЦ.

Обозначенные проблемы обуславливают необходимость разработки системы автоматического сбора и обработки данных алюминиевого электролизера, предназначенной для автоматического измерения уровня электролита и мониторинга видимых выбросов вредных веществ в атмосферу ЭЦ. Измеренное текущее значение уровня электролита позволяет вычислять актуальную наименьшую необходимую порцию глинозема (частоту срабатывания АПГ), достаточную для ведения технологического процесса электролиза криолит-глиноземного расплава при низких значениях КО, что приводит к снижению частоты анодных эффектов и числа выбросов ПФУ.

Цель работы — повышение эффективности управления процессом электролиза расплава глинозема в криолите на основе разработки и использования технических и программных решений для системы АПГ.

Материалы и методы исследования

Автоматическая система измерения уровня электролита

Высокая температура процесса электролиза криолит-глиноземного расплава и агрессивная среда существенно ограничивают применение датчиков [35] для определения уровня электролита. Для решения этой задачи были проанализированы возможности технических средств, устанавливаемых на пневмоцилиндр-пробойник АПГ для пробивки криолит-глиноземной корки (скорость зарастания корки составляет от 0,2 до 0,6 мм/мин [36]).

1. *Использование датчика Холла* на пневмоцилиндре с внутренним потенциометром.

Достоинства: классический способ определения выдвижения штока пневмоцилиндра.

Недостатки: использование дискретных датчиков Холла, установленных в один ряд, не обеспечивает требуемую точность измерения; невозможность применения в ЭЦ из-за изменяющегося магнитного поля (МГД-нестабильность, влияние на изменение магнитного поля проезжающего в цехе транспорта).

2. *Использование подпружиненных роликов* (3 ед., установлены с трех сторон), находящихся в постоянном контакте со штоком пневмоцилиндра. Валы роликов связаны с оптическим энкодером.

Достоинства: наличие механической связи; отсутствие влияния магнитного поля на измерение; возможность снимать показания при изгибе штока пневмоцилиндра с помощью подпружиненных колесиков, установленных с трех сторон, в случае пробивки криолит-глиноземной корки.

Недостатки: проскальзывание и заклинивание роликов; истирание штока; потеря герметичности пневмоцилиндра из-за высокой интенсивности пыления глиноземом в процессе питания.

3. *Использование аналоговых датчиков:* инфракрасных оптических, лазерных, ультразвуковых для определения расстояния до электролита в пробитой лунке (источник датчика направляется на лунку в криолит-глиноземной корке).

Недостатки: интенсивное пыление глинозема; переменное магнитное поле и высокие температуры не позволяют использовать такие датчики.

4. *Установка аналогового измерительного датчика* (инфракрасного оптического, лазерного), обладающего минимальными размерами, внутрь бесштоковой полости пневмоцилиндра — в «мертвый объем»¹ задней торцевой крышки (пространство между задней крышкой пневмоцилиндра и поршнем в конце хода) с изготовлением герметичного кабельного вывода. Источник инфракрасного света направляется на поршень пневмоцилиндра.

Достоинства: внутренняя полость не содержит пылевых частиц; отсутствие влияния магнитного поля на датчик (пневмоцилиндр является клеткой Фарадея).

Недостатки: точность датчика зависит от интенсивности инфракрасного излучения (т. е. на точность измерения влияет увеличение температуры среды); требуется калибровка датчика при рабочих температурах измерения.

После анализа возможности использования различных способов и технических средств для определения уровня электролита было решено применить малогабаритный аналоговый лазерный дальномер, установленный в «мертвый объем» задней торцевой крышки (рис. 1 и 2). Оптические датчики обеспечивают лучшую точность измерения по сравнению с ультразвуковыми, их широко применяют в металлургии [37].

В промышленных пневматических системах для смазки исполнительных устройств используют масляный туман, поэтому алгоритм работы предусматривает перекалибровку лазерного дальномера по крайним точкам выдвижения штока пневмоцилиндра 1 раз в сутки.

Так как источник инфракрасного света лазерного дальномера направлен на поршень пневмоцилиндра, то для определения уровня электролита требуется пересчитывать значения относительно высоты установки пневмоцилиндра.

Для автоматического определения момента касания наконечником пробойного устройства в конструкцию электролизера добавляется измерительная электрическая цепь переменного тока. Один ее контакт крепят к блюмсу (катоде) электролизной ванны, а второй — на многофункциональном пробойном устройстве АПГ, электрически изолированном от корпуса электролизера (см. рис. 1).

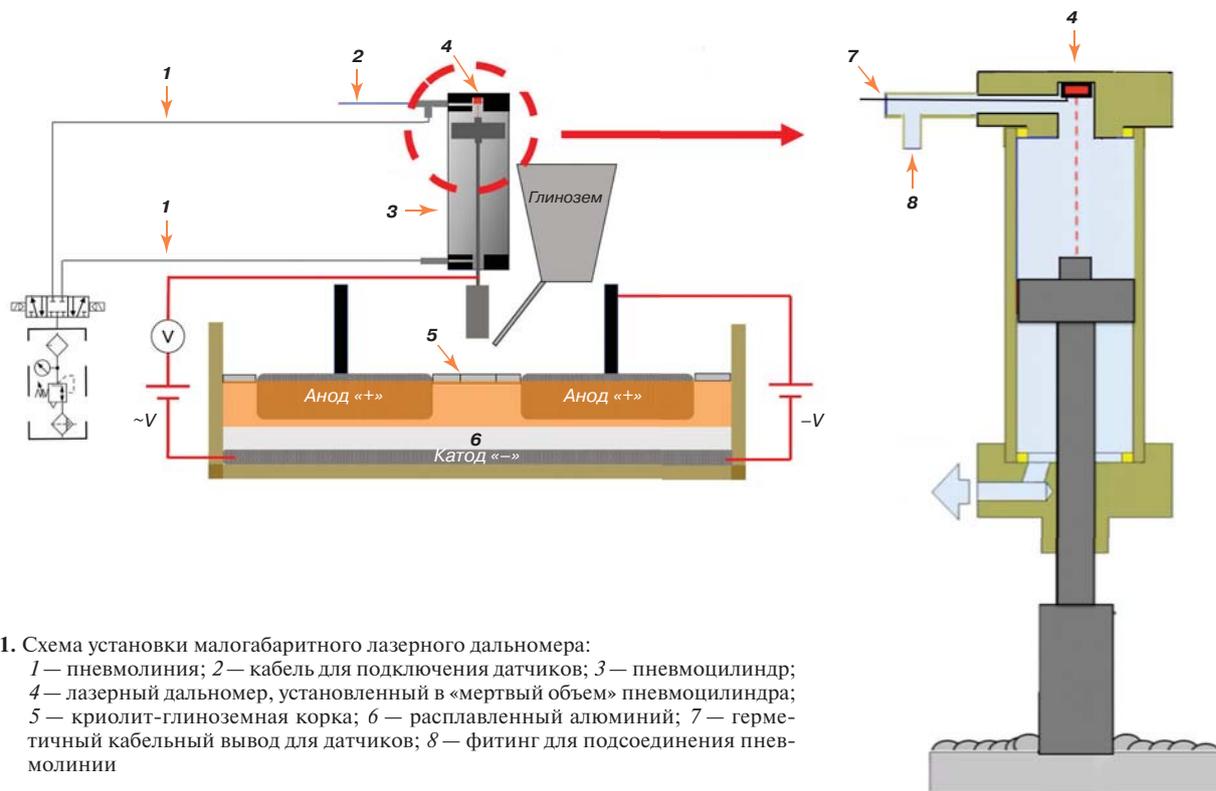


Рис. 1. Схема установки малогабаритного лазерного дальномера:
1 — пневмолиния; 2 — кабель для подключения датчиков; 3 — пневмоцилиндр;
4 — лазерный дальномер, установленный в «мертвый объем» пневмоцилиндра;
5 — криолит-глиноземная корка; 6 — расплавленный алюминий; 7 — герметичный кабельный вывод для датчиков; 8 — фитинг для подсоединения пневмолинии

¹Пневматика для всех. От теоретических основ к практическим навыкам. — М.: Учебно-научный центр Camozzi, 2019. — 239 с.

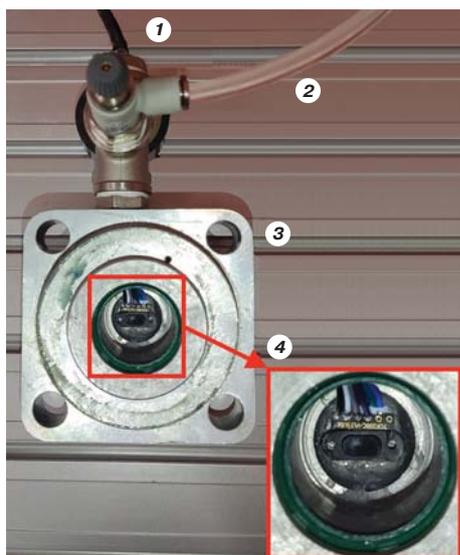


Рис. 2. Задняя крышка пневмоцилиндра. Место установки лазерного дальномера и датчика температуры (в «мертвом объеме» пневмоцилиндра):

1 — кабельный вывод; 2 — пневмотрубка; 3 — задняя крышка пневмоцилиндра; 4 — место установки датчиков

При касании наконечником пробойного устройства АПГ электролита происходит замыкание измерительной электрической цепи, следовательно можно говорить об успешной пробивке криолит-глиноземной корки.

Согласно результатам моделирования распределения температуры по электролизеру с силой тока 300 кА, пробойное устройство АПГ нагревается в диапазоне 110–125 °С [38]. Поэтому перед началом эксперимента показания лазерного дальномера были откалиброваны при температуре 110 °С.

Для исследования возможности использования лазерного дальномера в целях определения уровня электролита (величины выдвижения штока цилиндра) в процессе электролиза криолит-глиноземного расплава был собран лабораторный стенд (рис. 3). Стенд состоит из пневмоцилиндра двухстороннего действия

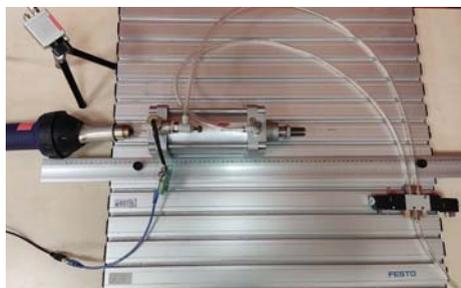


Рис. 3. Лабораторный стенд исследования зависимости показаний лазерного дальномера от нагрева для отслеживания величины выдвижения штока пневмоцилиндра

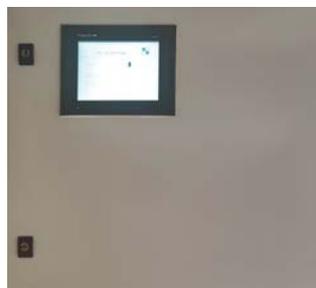


Рис. 4. Сенсорная панель оператора Magelis, установленная на дверцу шкафа управления



Рис. 5. Шкаф управления с ПЛК Schneider Electric Modicon 342020. Монтажная панель (вид спереди)

Camozzi 40M2L080A0100 (длина хода штока 100 мм, диаметр поршня 80 мм), в бесштоковую полость которого установлены лазерный дальномер TOF200C-VL53L0X (размер 20×11×4 мм, диапазон измерения 0–2000 мм, длина волны 940 нм, датчик измеряет расстояние путем определения «времени полета» излучаемого пучка света — ToF (Time-of-flight)) и датчик SHT40 для контроля температуры внутри цилиндра (диапазон измерения от –40 до +125 °С). Подключение датчиков к микроконтроллеру ATmega328P выполнено через герметичный кабельный вывод (см. рис. 2) по интерфейсу I²C*. Управление выдвижением штока пробойника осуществляется при помощи бистабильного электропневматического распределителя CAMOZZI 368-011-021L 5/3-1/8 с закрытой центральной позицией, подсоединенного к пневмолинии давлением 0,51 МПа, и двумя соленоидами CAMOZZI U73 DC 24V, подключенными к шкафу управления с программируемым логическим контроллером (ПЛК) Schneider Electric Modicon 342020 (рис. 4, 5). Для нагрева пневмоцилиндра до 120 °С используют термофен Weldy с плавной регулировкой температуры от 100 до 600 °С, для контроля нагрева корпуса пробойника — инфракрасный тепловизор Opttris RPI 200. Действительную величину выдвижения штока пробойника определяют поверенной лабораторной линейкой.

Автоматическая система мониторинга видимых выбросов вредных веществ в атмосфере ЭЦ

Для обнаружения видимых выбросов вредных веществ в атмосфере ЭЦ (для электролизеров с обожженными анодами (ОА)) ранее² была обучена сверточная пирамидальная нейронная сеть [39–41], 800 фотографий (80 %) использовали для обучения нейронной сети, 200 фотографий (20 %) — для тестирования [42–44]. На фотографиях запечатлены макеты электролизеров с разных ракурсов, с различной степенью задымления и освещенности. Пример обнаружения нейронной сетью видимых выбросов представлен на рис. 6.

*I²C — Inter-Integrated Circuit, протокол синхронной связи.

²Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Y. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminum plant based on technical vision and a neural network // Metallurgist. 2023. Vol. 66. P. 1308–1319.

Результаты исследования и их обсуждение

Общая точность обученной нейронной сети составила 94,752 %, что подтверждает адекватность обученной модели и возможность ее использования на производстве [45–47].

Для расчета экономического эффекта необходимо определить число требуемых широкоугольных промышленных камер на основе чертежей реального ЭЦ [48–50]. По результатам геометрического расчета (рис. 7) определено, что одна широкоугольная (120°) камера способна захватывать 5 электролизеров.



Рис. 6. Пример распознавания видимых выбросов вредных веществ на масштабных моделях электролизера с использованием обученной нейронной сети

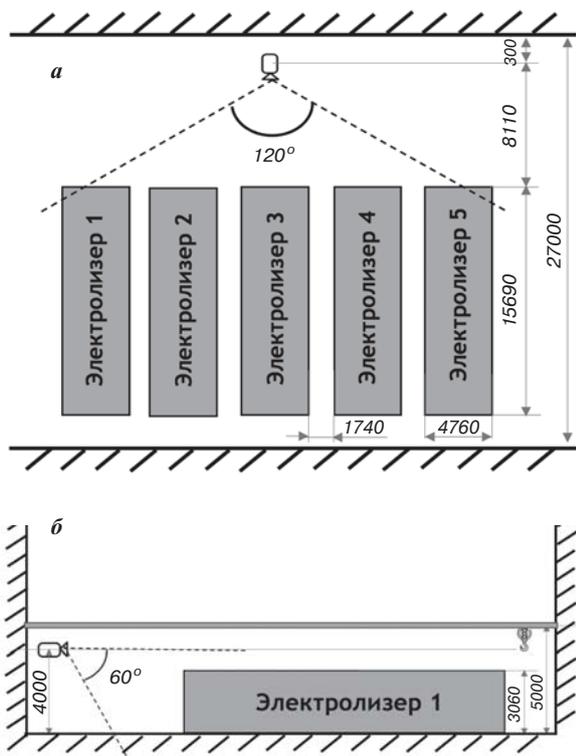


Рис. 7. Схема монтажа камеры на плане ЭЦ Братского алюминиевого завода:
а — вид сверху; б — вид сбоку

В рамках лабораторного эксперимента фиксировали данные о положении штока, регистрируемые лазерным дальномером, а также полученные при помощи поверенной лабораторной линейки, при различной величине выдвижения штока. Дополнительно измеряли значения температуры внутри бесштоковой полости пневмоцилиндра, регистрируемые датчиком температуры, установленным вместе с лазерным дальномером. Внешнюю температуру пневмоцилиндра поддерживали в диапазоне 110–125 °С и контролировали с помощью инфракрасного тепловизора Optris RPI 200 (рис. 8).

Результаты исследования (рис. 9) показали, что лазерный дальномер TOF200C-VL53L0X способен работать при температурах до 120 °С, а его показания увеличиваются на 4 мм при повышении температуры внутри пневмоцилиндра на 7 °С (с 110 до 117 °С). Максимальное выдвижение штока пневмоцилиндра приводит к снижению температуры внутри пневмоцилиндра на 4 °С. Погрешность датчика при температурах от 110 до 120 °С составила 4 %.

Автоматическое измерение уровня электролита с учетом изменения высоты слоя металла позволяет регулировать концентрацию глинозема путем изменения интервала питания АПГ, осуществлять технологический процесс без возникновения анодных эффектов, «голодания» электролизера и выпадения глинозема в осадок. Работу автоматической системы можно описать следующими формулами:

$$A = M_{el} \cdot \frac{\Delta C}{100} = (\rho L_b B_b h_{el}) \cdot \frac{\Delta C}{100}, \text{ кг}, \quad (1)$$

где A — разовая доза глинозема, загружаемая в электролизер, кг; M_{el} — масса электролита в ванне, кг; L_b — длина электролизной ванны, м; B_b — ширина электролизной ванны, м; h_{el} — высота слоя электролита, м; ΔC — отклонение концентрации глинозема от заданного уровня C , % (мас.).

$$T = \frac{A}{P} = \frac{A}{q I \eta_T \frac{\vartheta}{60}}, \text{ с} \quad (2)$$

где T — период питания ванны глиноземом; A — разовая доза глинозема, загружаемая в электролизер, кг; P — скорость потребления глинозема в электрохимической реакции, кг/мин; q — электрохимический эквивалент алюминия, равный 0,336 кг/кА·ч; I — сила тока, кА; η_T — выход по току, ед.; ϑ — удельный расход глинозема, кг/кг Al; 60 — число минут в 1 ч.

Стоит отметить, что автоматическая система определения уровня электролита разработана не для замены существующей системы управления АПГ, а в качестве дополнения к ней. Система используется для расчета порции глинозема (путем изменения интервала питания АПГ).

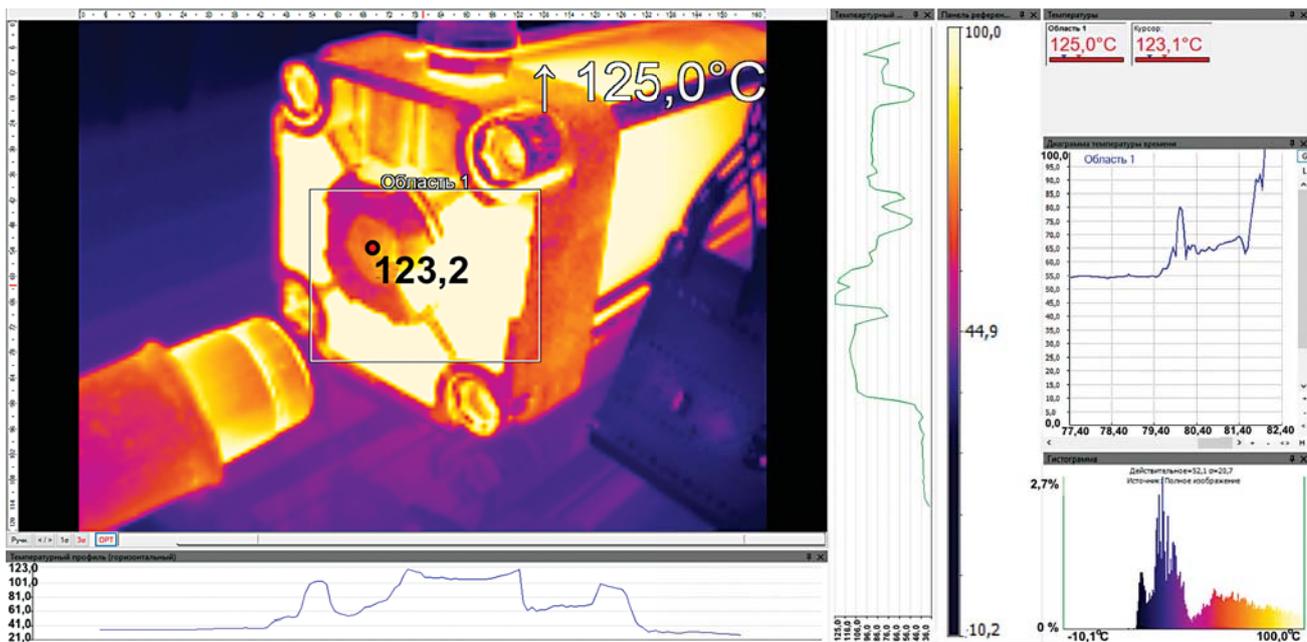


Рис. 8. Контроль нагрева пробойного устройства инфракрасным тепловизором (вид с экрана монитора)



Рис. 9. Сравнение значений, зарегистрированных лазерным дальномером TOF200C-VL53L0X при нагреве до 120 °С с действительной величиной выдвигения штока пробойного устройства

Также автоматическое определение уровня электролита позволяет точнее дозировать автоматическую подачу дробленого электролита (при наличии бункеров с дробленым электролитом).

Экономический эффект от внедрения автоматической системы мониторинга видимых выбросов вредных веществ в атмосфере ЭЦ

Отечественный производитель первичного алюминия ОК РУСАЛ с 2018 г. разрабатывает собственную систему мониторинга видимых выбросов вредных веществ в ЭЦ, однако она рассчитана для электролизеров Содерберга и, согласно открытым источникам, планируется к внедрению в 2023–2024 гг. в шести корпусах Братского алюминиевого завода [12, 33].

Стоимость реализации предлагаемой авторами системы технического зрения для обнаружения видимых выбросов вредных веществ в ЭЦ на примере

Хакасского алюминиевого завода с 336 электролизерами с ОА³, представлена в **таблице**.

Предлагаемая система построена на базе распределенной архитектуры сети и, таким образом, обладает преимуществом перед клиент-серверной архитектурой, используемой в системе мониторинга ОК РУСАЛ [31]:

- более надежна и отказоустойчива (нерезервируемым элементом является только центральный коммутатор);
- предназначена для более мощных и современных электролизеров с ОА;
- не уступает по общей точности;
- дешевле в реализации, чем аналоги на базе клиент-серверной архитектуры, а также

повышает оперативность обнаружения видимых выбросов, нарушений сплошности (целостности) криолит-глиноземной корки по сравнению с визуальным наблюдением минимум в 2 раза, что позволяет своевременно восстановить укрытие электролизера.

Обобщенная структурная схема сети системы мониторинга электролизера с использованием многофункционального пробойного устройства и системы технического зрения для определения видимых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха представлена на **рис. 10**.

В левой части рисунка показана распределенная архитектура сети, разработанной автоматической системы мониторинга видимых выбросов на примере одноплатного компьютера NVIDIA Jetson Nano 4gb. Один

³Официальный сайт компании ОК РУСАЛ. Хакасский алюминиевый завод. — URL: <https://rusal.ru/innovation/development/khaz/>.

Стоимость реализации разработанной автоматической системы мониторинга на примере Хакасского алюминиевого завода

Оборудование	Стоимость за 1 ед/м, долл.	Требуемое число, ед/м	Стоимость оборудования, долл.	Общая стоимость оборудования, долл.	Стоимость разработки системы, монтажных работ и сопутствующие расходы, долл.	Общая стоимость разработанной системы, долл.
Защищенная камера с углом обзора 120°	1000	68	68 000	75 650	30 000	105 650
Одноплатный компьютер NVIDIA Jetson Nano 4gb в защищенном исполнении (система охлаждения, корпус, SD-карта), позволяющий обрабатывать до 18 видеопотоков разрешением 720p	300	4 + 2 резервных	1800			
Коммутатор на 24 входа	250	4 + 1 общий	1250			
Файловый сервер	2000	1 + 1 резервный	4000			
Экранированная витая пара CAT6, макс. скорость передачи до 1 Гбит/с	0,15	4000	600			

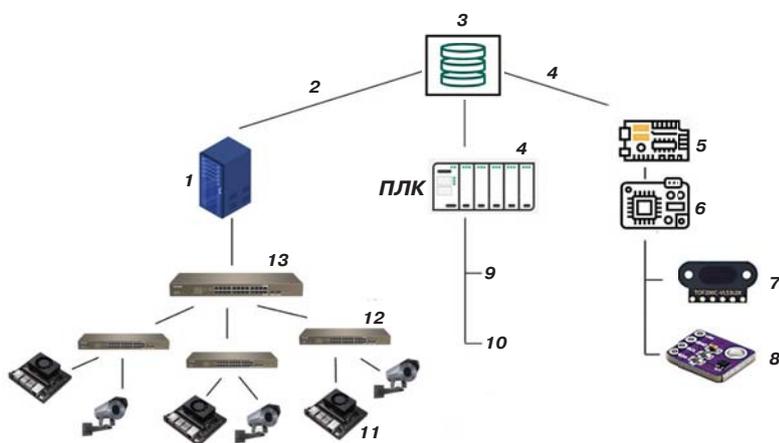


Рис. 10. Структурная схема сети:

1 — сервер хранения лог-файлов NVIDIA Jetson Nano; 2 — протокол SFTP; 3 — OPC-сервер; 4 — протокол Modbus TCP/IP; 5 — плата расширения Ethernet; 6 — микроконтроллер ATmega328p; 7 — лазерный дальномер TOF200C-VL53L0X; 8 — датчик температуры SHT40; 9 — пневматические распределители для пробойных устройств; 10 — другие датчики и исполнительные устройства; 11 — NVIDIA Jetson Nano; 12 — коммутатор 1 Гбит Ethernet; 13 — передача лог-файлов системы

одноплатный компьютер способен одновременно обрабатывать до 18 видеопотоков с разрешением 720p и частотой 30 к/с (битрейт⁴ видео 4 Мбит/с). Для подключения используют гигабитный Ethernet-кабель. В правой части отображены используемые датчики, исполнительные устройства, ПЛК и микроконтроллер, а также протоколы передачи данных.

⁴Количество бит, используемых для передачи/обработки данных в единицу времени.

Заключение

Разработанные многофункциональное пробойное устройство для автоматического определения уровня электролита и система технического зрения для обнаружения видимых выбросов вредных веществ в атмосфере ЭЦ, по мнению авторов, способствуют решению проблемы низкой адекватности измерительных комплексов в алюминиевой промышленности. Представленные решения позволяют вести технологический процесс при низких значениях КО благодаря постоянной автоматической корректировке периода питания электролизной ванны глиноземом и фторосолями с минимальной вероятностью возникновения анодных эффектов.

Использование лазерного дальномера, помещенного внутрь цилиндра АПГ, позволяет производить измерения в менее агрессивной среде и в автоматическом режиме и тем самым исключить необходимость разгерметизации электролизера и нарушения теплового режима ванны при измерениях вручную.

Система технического зрения для обнаружения видимых выбросов вредных веществ в ЭЦ является важным элементом системы охраны труда, а также дает возможность обнаруживать нарушения сплошности криолит-глиноземной корки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок



Tsvetnye Metally. 2023. No. 4. pp. 45–53
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.06

USE OF MULTIFUNCTIONAL CRUST BREAKER AND MACHINE VISION SYSTEM FOR ACQUISITION AND PROCESSING OF ALUMINIUM REDUCTION CELL DATA

Information about authors

P. A. Petrov, Dean of the Minerals Processing Faculty, Candidate of Technical Sciences¹, e-mail: Petrov_PA3@pers.spmi.ru
A. K. Shestakov, Postgraduate Student at the Department of Process and Plant Automation¹, e-mail: s195017@stud.spmi.ru
M. Yu. Nikolaev, Master's Student at the Department of Process and Plant Automation¹, e-mail: s212364@stud.spmi.ru

¹Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

The aluminium output control systems that are most commonly used in practice fail to ensure timely monitoring and adjustment of the key process parameters, such as electrolyte temperature, alumina concentration, cryolite ratio, metal and electrolyte levels. These parameters are measured manually, at a large interval (once a day). The difficulty of introducing automatic control systems comes down to the fact that most instruments and solutions are not practicable due to harsh process environment (i.e. high temperature, harmful emissions, alumina dusting, varying magnetic field). This paper describes a solution that enables to automatically collect electrolyte level values without compromising the tightness of the cell during measurement. The measurements are taken with a laser distance meter installed inside a crust breaker cylinder of the point feeding control system. Knowing the level of electrolyte in each feed cycle, one can define the smallest portion of alumina (the feeding interval) and add crushed bath automatically (if there is a hopper with a crushed bath feeding device). A neural network-based machine vision system developed for detecting visible emissions helps to quickly restore the cell cover in case of cryolite-alumina crust breakage or loss of cell tightness.

Key words: electrowinning of aluminium, electrolyte level monitoring, laser distance meter, automatic alumina feeding, TensorFlow, machine learning, convolutional neural network, object recognition, machine vision, emissions.

References

- Sizyakov V. M., Polyakov P. V., Bazhin V. Yu. Current trends and strategic objectives in the production of aluminium and its alloys in Russia. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 16–23.
- Tarabarinova T. A., Golovina E. I. Capitalization of mineral resources as an innovation ecological strategy. *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2021. Vol. 4. pp. 86–96. DOI: 10.20403/2078-0575-2021-4-86-96.
- Savchenko S., Beloglazov I. Features of the process obtaining of Mg – Zn – Y master alloy by the metallothermic recovery method of yttrium fluoride melt. *Crystals*. 2022. Vol. 12. p. 771. DOI: 10.3390/cryst12060771.
- Bolobov V. I., Chupin S. A., Bochkov V. S., Akhmerov E. V., Plaschinsky V. A. The Effect of finely divided martensite of austenitic high manganese steel on the wear resistance of the excavator buckets teeth. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 854. pp. 3–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.854.3.
- Ojeda Pardo F. R., Sánchez Figueredo R. P., Belette Fuentes O., Quiroz Cabascango V. E. et al. Metallographic properties evaluation of the specimens obtained by the vibratory method (cast iron ISO 400-12). *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2388. p. 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012058.
- Zakirova G., Pshenin V., Tashbulatov R., Rozanova L. Modern bitumen oil mixture models in ashalchinsky field with low-viscosity solvent at various temperatures and solvent concentrations. *Energies*. 2023. Vol. 16. p. 395. DOI: 10.3390/EN16010395.
- Bolshunov A. V., Vasilev D. A., Ignatiev S. A., Dmitriev A. N., Vasilev N. I. Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. *Ice and Snow*. 2022. Vol. 62. pp. 35–46. DOI: 10.31857/S2076673422010114.
- Kozyrev B. A., Sizyakov V. M., Arsenyev V. A. Principles of rational processing of red mud with the use of carboxylic acids. *Non-Ferrous Metals*. 2022. Vol. 53. pp. 30–34. DOI: 10.17580/nfm.2022.02.05.
- Fedorova E., Pupysheva E., Morgunov V. Modelling of red-mud particle-solid distribution in the feeder cup of a thickener using the combined CFD-DPM approach. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. p. 2314. DOI: 10.3390/sym14112314.
- Gorlanov E. S., Kawalla R., Polyakov A. A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 2. Development prospects. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 10. pp. 42–49. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.06.
- Martynov S. A., Masko O. N., Fedorov S. N. Innovative ore-thermal furnace control systems. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 4. pp. 87–94. DOI: 10.17580/tsm.2022.04.11.
- The Program for improving the environmental efficiency of the branch office PJSC RUSAL Bratsk in Shelekhov. 2019. (n.d.).
- Dubovikov O. A., Beloglazov I. I., Alekseev A. A. Specific features of the use of pulverized coal fuel in combined chemical processing. *Obogashchenie Rud*. 2022. No. 6. pp. 32–38. DOI: 10.17580/or.2022.06.06.
- Litvinova T., Kashurin R., Zhadovskiy I., Gerasev S. The kinetic aspects of the dissolution of slightly soluble lanthanoid carbonates. *Metals*. 2021. Vol. 11. p. 1793. DOI: 10.3390/met11111793.
- Kashurin R. R., Gerasev S. A., Litvinova T. E., Zhadovskiy I. T. Prospective recovery of rare earth elements from waste. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1679, Iss. 5. p. 052070. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052070.
- Boduen A. Ya., Petrov G. V., Kobylansky A. A., Bulaev A. G. Sulfide leaching of high-grade arsenic copper concentrates. *Obogashchenie Rud*. 2022. No. 1. pp. 14–20. DOI: 10.17580/or.2022.01.03.
- Awrejcewicz J., Oikonomou V. K., Boikov A., Payor V. The present issues of control automation for levitation metal melting. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. p. 1968. DOI: 10.3390/sym14101968.
- Cabascango V. E. Q., Bazhin V. Y., Martynov S. A., Pardo F. R. O. Automatic control system for thermal state of reverberatory furnaces in production of nickel alloys. *Metallurgist*. 2022. Vol. 66. pp. 104–116. DOI: 10.1007/S11015-022-01304-3.
- Nguyen H. H., Bazhin V. Y. Optimization of control system for electrolytic copper refining with digital twin during dendritic precipitation. *Metallurg*. 2023. No. 1. pp. 49–56. DOI: 10.52351/00260827_2023_01_49.
- Potocnik V., Reverdy M. History of computer control of aluminum reduction cells. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2021. Vol. 6. pp. 591–599. DOI: 10.1007/978-3-030-65396-5_81/cover.
- Nozhko S. I., Grishaev I. I., Puzanov I. I., Zheleznyak Ya. M., Belotelov A. Yu. Usage of the new method of estimation of metal and electrolyte levels on aluminium electrolyzers for improving approximation of measurements. *Tsvetnye Metally*. 2010. No. 9. pp. 48–51.
- Wang X., Hosler B., Tarcy G. Alcoa STARprobeTM. *Essential Readings in Light Metals*. 2016. Vol. 2. pp. 844–850. DOI: 10.1007/978-3-319-48156-2_126.
- Wang X., Tarcy G., Batista E., Wood G. Active pot control using alcoa STARprobeTM. *Light Metals*. 2011. pp. 491–496. DOI: 10.1002/9781118061992.ch87.
- Wang X. Alcoa STARprobeTM – update in further development for measuring cryolite properties. *Light Metals*. 2016. pp. 395–402. DOI: 10.1002/9781119274780.ch65.
- Fardeau S., Mattel A., Marcellin P., Richard P. Statistical evaluation and modeling of the link between anode effects and bath height, and implications for the ALPSYS pot control system. *TMS Light Metals*. 2014. pp. 845–850. DOI: 10.1007/978-3-319-48144-9_142/cover.
- Verreault J., Desgroseilliers B., Gariépy R., Simard C., Simard S. et al. Retrofit of a combined breaker feeder with a chisel bath contact detection system to reduce anode effect frequency in a potroom. *Light Metals*. 2011. pp. 467–470. DOI: 10.1007/978-3-319-48160-9_83.
- Nikandrov K., Zarouni A., Akhmetov S., Ahli N. Evolution of crust breaker control for DX+ and DX+ Ultra Technologies. *Light Metals*. 2016. pp. 511–514. DOI: 10.1002/9781119274780.ch84.
- Zhang H., Li T., Li J., Yang S., Zou Z. Progress in aluminum electrolysis control and future direction for smart aluminum electrolysis plant. *JOM*. 2017. Vol. 69. pp. 292–300. DOI: 10.1007/S11837-016-2150-4.
- Mulder A., Gao Y., Zhou D., Wong D. S., Ming L. et al. New generation control for daily aluminium smelter improvement generation 3 process control for potlines. *Light Metals*. 2014. pp. 835–840. DOI: 10.1002/9781118888438.ch140.
- Viumdal H., Mylvaganam S. Beyond the dip stick: Level measurements in aluminum electrolysis. *JOM*. 2010. Vol. 62. pp. 18–25. DOI: 10.1007/S11837-010-0161-0.
- Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC Rusal's aluminum smelters sustainable development. *Light Metals*. 2019. pp. 553–563. DOI: 10.1007/978-3-030-05864-7_70.
- Zherdev A., Svoevskiy A., Pingin V., Shakhmatov V., Shtefanyuk Y. Environmental enhancement of potroom processes by using a machine vision system. *Light Metals*. 2022. pp. 979–984. DOI: 10.1007/978-3-030-92529-1_127.
- RUSAL Sustainability Report 2020. Available at: <https://rusal.ru/sustainability/report/> (Accessed: 6.04.2023).
- Bazhin V., Masko O. Monitoring of the behaviour and state of nanoscale particles in a gas cleaning system of an ore-thermal furnace. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. pp. 923. DOI: 10.3390/sym14050923.
- Shklyarskiy Y. E., Batueva D. E. Operation mode selection algorithm development of a wind-diesel power plant supply complex. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 115–126. DOI: 10.31897/pmi.2022.7.

36. Isaeva L. A., Mikhalev Y. G., Zharinova N. Y. Dynamics of formation and properties of cryolite-aluminous crusts. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 8. pp. 56–61. DOI: 10.17580/tsm.2020.08.07.
37. Non-destructive testing systems: how they help to produce products in continuous machine operation. Available at: <https://habr.com/ru/company/severstal/blog/567516/> (Accessed: 15.01.2023).
38. Gusberti V., Severo D. S., Welch B. J., Skyllas-Kazacos M. Modelling the aluminium smelting cell mass and energy balance – a tool based on the 1st law of thermodynamics.
39. Kashin D. A., Kulchitskiy A. A. Image-based quality monitoring of metallurgical briquettes. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 9. pp. 92–98. DOI: 10.17580/tsm.2022.09.13.
40. Chen L. C., Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A. L. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2018. Vol. 40. pp. 834–848. DOI: 10.1109/tpami.2017.2699184.
41. Zakharov L., Martynushev D., Ponomareva I. N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 23–32. DOI: 10.31897/pmi.2022.11.
42. Boikov A., Payor V., Savelev R., Kolesnikov A. Synthetic data generation for steel defect detection and classification using deep learning. *Symmetry*. 2021. Vol. 13. DOI: 10.3390/sym13071176.
43. Vasilyeva N. V., Boikov A. V., Erokhina O. O., Trifonov A. Y. Automated digitization of radial charts. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 82–87. DOI: 10.31897/pmi.2021.1.9.
44. Pshenin V., Liagova A., Razin A., Skorobogatov A., Komarovskiy M. Robot Crawler for surveying pipelines and metal structures of complex spatial configuration. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7. p. 75. DOI: 10.3390/infrastructures7060075.
45. Chen C., Chen Q., Xu J., Koltun V. Learning to See in the Dark. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. pp. 3291–3300. DOI: 10.1109/cvpr.2018.00347.
46. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016. pp. 770–778. DOI: 10.1109/cvpr.2016.90.
47. Zhao S., Xie Y., Yue W., Chen X. A machine learning method for state identification of superheat degree with flame interference. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2019. pp. 199–208. DOI: 10.1007/978-3-030-05955-2_19.
48. Töreyn B. U., Çetin A. E. Online detection of fire in video. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007. DOI: 10.1109/cvpr.2007.383442.
49. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 2017. Vol. 60. pp. 84–90. DOI: 10.1145/3065386.
50. Paszke A., Gross S., Massa F., Lerer A., Bradbury J. et al. An imperative style, high-performance deep learning library. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2019. Vol. 32. pp. 8024–8035.

Автоматизированный контроль и управление балансом шихты при производстве металлургического кремния

УДК 681.518.5



В. Ю. Бажин,
заведующий кафедрой
металлургии,
профессор,
докт. техн. наук,
эл. почта:
bazhin_vyu@pers.spmi.ru



О. Н. Масько,
аспирант кафедры
автоматизации
технологических процессов
и производств (АТПП),
эл. почта:
olgamasko.17@gmail.com



С. А. Мартынов,
ассистент
кафедры АТПП,
канд. техн. наук,
эл. почта:
direktor062@mail.ru

Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Производство металлургического кремния для Si-сплавов и силуминов является стратегическим и определяет развитие многих отраслей отечественной промышленности. Основной задачей ресурсосбережения при производстве кремния является снижение массы технического кремнезема, находящегося в расходной части баланса. В современных условиях разработка системы контроля и управления балансом шихты на основе кварца в производстве металлургического кремния необходима для решения проблем, связанных с использованием разных источников сырья при различном содержании примесей, снижающих энергетическую эффективность плавки и качество производимого кремния. В основе предлагаемой системы лежат математические расчеты и модели, разработанные с учетом физико-химических, полиморфных превращений кварцевого сырья во время плавки в рудно-термической печи. В работе использованы полученные ранее зависимости объема и характера выбросов микрокремнезема от химического и гранулометрического состава, строения кварцевого сырья, температуры ведения плавки. Для получения новых данных о пылегазовых выбросах была использована CFD-модель газоотводящего тракта печи. В результате разработан алгоритм системы, позволяющий анализировать влияние качества минерального сырья на объем и характер выбросов кремниевого производства. Реализован центральный модуль сбора и анализа данных, связывающий химический и гранулометрический состав отобранных с производства трех источников кварцевого сырья при их согласовании с ключевыми параметрами плавки (скорость, давление отходящих газов, электрический режим). Программа мониторинга и управления материальным балансом с учетом примесных элементов и соединений, переходных и фазовых состояний кремнезема на всех этапах плавки дает возможность контролировать выход отходов в виде микрокремнезема необходимой структуры для его переработки в материалы с высокой добавленной стоимостью. Предлагаемая система контроля и управления балансом позволит повысить эффективность процесса на 15–20 %.

Ключевые слова: металлургический кремний, карботермическое восстановление, рудно-термическая печь, примеси, контроль химического состава, баланс по кремнезему, полиморфизм микрокремнезема.

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.07