

О Т З Ы В

официального оппонента, доктора технических наук, доцента

Лаврова Владислава Васильевича на диссертацию

Шестакова Алексея Константиновича на тему: «Разработка автоматической системы сбора и обработки данных алюминиевого электролизера с использованием многофункционального пробойника и системы технического зрения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность диссертационного исследования определяется высокой научно-технической и производственной значимостью задач автоматизации алюминиевого электролиза. Процесс электролиза криолито-глиноземного расплава (КГР) относится к сложным непрерывным технологическим процессам, протекающим при высокой температуре, в агрессивной химической среде, при интенсивных электромагнитных воздействиях, пылегазовых выбросах и существенной неопределенности внутренних параметров. Для такого объекта качество управления прямо зависит от полноты, достоверности и оперативности технологической информации, поступающей в систему автоматического управления.

Автор обоснованно исходит из того, что существующие системы управления электролизом, несмотря на их промышленную зрелость, по-прежнему ограничены числом непосредственно измеряемых параметров. Уровень электролита, состояние разрушения криолито-глиноземной корки, косвенные признаки текущего содержания глинозема и признаки наблюдаемых выбросов в электролизном цехе либо контролируются вручную, либо оцениваются с задержкой. Такая ситуация приводит к запаздыванию корректирующих воздействий, повышает риск возникновения анодных эффектов, образования осадка глинозема на подине, нарушения теплового режима ванны и роста выбросов перфторуглеродов.

Особую значимость имеет выбранная автором постановка задачи: речь идет не только о создании отдельного датчика или отдельного программного модуля, а о расширении информационной базы АСУ ТП алюминиевого электролизера за счет многофункционального пробойника, анализа низкочастотных шумов напряжения и системы технического зрения. Такой подход соответствует современному направлению развития автоматизации металлургических процессов, связанному с переходом от эпизодического ручного контроля к автоматическому сбору, обработке и использованию технологических данных в управляющих алгоритмах.

Актуальность работы усиливается экологическим фактором. Для алюминиевого производства принципиальное значение имеют оперативное предупреждение анодных эффектов, уменьшение выбросов перфторуглеродов, поддержание сплошности укрытия электролизера и ускоренное выявление видимых выбросов загрязняющих веществ. Поэтому результаты диссертации ориентированы одновременно на повышение устойчивости

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-138 от 04.06.26
АУ УС

технологического режима, снижение производственных рисков, улучшение условий труда и экологической результативности производства.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», прежде всего по направлениям автоматизации контроля и испытаний, научных основ и алгоритмического обеспечения систем автоматизированного управления технологическими объектами, а также повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах разработки, внедрения и эксплуатации. Наличие конкретного технологического объекта – алюминиевого электролизера – и связь предложенных решений с алгоритмами контроля, мониторинга и управления подтверждают принадлежность работы к указанной специальности.

Таким образом, тема диссертации является актуальной, имеет выраженный научно-технический и прикладной характер и направлена на решение значимой задачи автоматизации технологического процесса электролитического получения алюминия.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна диссертационной работы А.К. Шестакова состоит в получении новых результатов, связанных с автоматическим контролем технологических параметров алюминиевого электролизера и использованием этих параметров в алгоритмах управления питанием и мониторинга состояния электролизной ванны.

1. Разработан и обоснован способ автоматического определения уровня электролита без локальной разгерметизации створчатых укрытий, основанный на использовании модернизированного пневмоцилиндра АПГ с оптическим дальномером и измерительной электрической цепью постоянного тока для фиксации момента касания расплава наконечником пробойника. Новизна результата состоит в использовании исполнительного устройства пробивки корки не только как механизма разрушения корки, но и как измерительной платформы для оперативного получения технологической информации.

2. Получены экспериментальные данные о преобладающих низкочастотных компонентах шумов напряжения лабораторного электролизера в диапазоне 0-1 Гц и их амплитудных характеристиках при различном содержании глинозема в криолито-глиноземном расплаве. Установленные частотно-амплитудные признаки создают основу для косвенной оценки состояния расплава и расширения измерительной части АСУ ТП.

3. Разработан алгоритм питания электролизной ванны, учитывающий изменение уровня электролита при каждом цикле питания и использующий косвенную оценку текущего содержания глинозема. Научный результат заключается в увязке измерительного канала уровня электролита и частотного анализа напряжения с расчетом управляющего воздействия на систему автоматической подачи глинозема.

4. Разработана методика контроля разрушения криолито-глиноземной корки, направленная на повышение надежности подачи глинозема, предупреждение образования непробитых зон и снижение вероятности анодного эффекта.

5. Предложен алгоритм обнаружения видимых выбросов вредных веществ в электролизном цехе с использованием системы технического зрения и нейросетевой модели. Новизна результата состоит в адаптации методов компьютерного зрения к задаче

промышленного мониторинга алюминиевого электролизера и в предложении распределенной архитектуры обработки видеопотоков на базе периферийных вычислительных устройств.

Совокупность перечисленных результатов имеет научную ценность, поскольку демонстрирует переход от локальных средств измерения к многоканальной автоматической системе сбора и обработки данных технологического объекта, в которой механическое исполнительное устройство, измерительные цепи, алгоритмы обработки электрических сигналов и нейросетевой визуальный контроль рассматриваются как взаимосвязанные элементы автоматизации.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, следует признать достаточной для кандидатской диссертации. Работа построена логично: от анализа технологического процесса и существующих АСУ ТП автор переходит к выявлению недостаточно контролируемых параметров, далее – к разработке измерительных и алгоритмических решений, экспериментальной проверке, оценке точности и рассмотрению практической применимости.

Обоснованность постановки задачи подтверждается анализом физико-химических и технологических особенностей электролиза криолито-глиноземного расплава. Автор показывает, что уровень электролита, содержание глинозема, состояние криолито-глиноземной корки и наблюдаемые выбросы являются информативными параметрами для предупреждения анодных эффектов и поддержания устойчивого технологического режима.

Достоверность результатов по определению уровня электролита обеспечивается разработкой конструктивной схемы многофункционального пробойного устройства, сравнением возможных способов измерения положения штока, использованием оптического дальномера, установленного в менее агрессивной зоне пневмоцилиндра, а также экспериментальной проверкой его работоспособности при нагреве. В работе показано, что максимальная относительная погрешность определения хода штока при температурах 110-125 °С не превышает 2%, что соответствует положению, вынесенному на защиту.

Достоверность результатов по косвенной оценке содержания глинозема подтверждается лабораторными экспериментами с регистрацией напряжения и применением метода быстрого преобразования Фурье. Автором выделены частотно-амплитудные признаки, соответствующие различным концентрациям Al_2O_3 в расплаве; при этом результаты интерпретированы с учетом изменения смачивания анода электролитом, коалесценции пузырьков и изменения газового слоя в межполюсном пространстве. Такая физическая интерпретация повышает убедительность полученных экспериментальных закономерностей.

Результаты по системе технического зрения обоснованы созданием лабораторного стенда, формированием и разметкой массива изображений, обучением нейросетевой модели с использованием библиотеки TensorFlow и проверкой обнаружения видимых выбросов. В автореферате указана общая точность не менее 94%, что подтверждает принципиальную работоспособность предложенного подхода для задачи визуального мониторинга.

Практическая достоверность работы дополнительно подтверждается апробацией результатов на конференциях и семинарах, публикациями автора, патентованием технического решения, а также актом внедрения результатов в АО «СоюзЦМА». Следует

отметить, что часть результатов, особенно относящихся к техническому зрению, требует дальнейшей промышленной валидации на длительных сериях реальных цеховых видеоданных; это отражено в замечаниях, но не отменяет общей обоснованности выполненного исследования.

4. Научные результаты, их ценность

К числу основных научных результатов диссертационной работы относятся следующие:

- 1) метод автоматического измерения уровня электролита с использованием модернизированного пробойного устройства АПГ;
- 2) экспериментально обоснованные признаки низкочастотных шумов напряжения, связанные с содержанием глинозема;
- 3) алгоритм питания электролизной ванны с учетом уровня электролита и косвенной оценки содержания Al_2O_3 ;
- 4) методика контроля разрушения корки; алгоритм обнаружения видимых выбросов с использованием системы технического зрения и нейронной сети.

Первый результат ценен тем, что решает одну из существенных проблем АСУ ТП алюминиевого электролиза – ограниченность автоматических измерений внутренних параметров ванны. Предложенное использование пробойника как измерительной платформы позволяет получать информацию об уровне электролита без открытия укрытий, что уменьшает тепловое и экологическое воздействие ручных измерений и повышает оперативность контроля.

Второй результат имеет самостоятельное значение для развития косвенных измерительных каналов. Выделение преобладающих низких частот и амплитуд шумов напряжения при различных концентрациях глинозема позволяет перейти от традиционного анализа только среднего напряжения ванны к более информативной обработке динамических составляющих сигнала. Для сложного металлургического объекта, где прямое непрерывное измерение содержания глинозема затруднено, такой результат представляет научный и прикладной интерес.

Третий результат – алгоритм питания электролизной ванны – важен тем, что связывает результаты измерения и обработки данных с управляющим воздействием. В диссертации показано, что учет уровня электролита при расчете дозы или интервала подачи глинозема позволяет более корректно оценивать массу электролита, условия растворения порции глинозема и риск возникновения анодного эффекта. Тем самым разработка выходит за рамки измерительной задачи и относится непосредственно к алгоритмическому обеспечению управления технологическим процессом.

Методика контроля разрушения корки имеет ценность для повышения надежности работы системы автоматической подачи глинозема. Неполное пробитие корки приводит к накоплению глинозема в точках питания, снижению качества растворения, образованию осадка и ухудшению технологического режима. Предложенное решение формирует обратную связь о факте пробития и тем самым повышает диагностируемость исполнительного механизма.

Результат, связанный с системой технического зрения, расширяет область применения интеллектуальных методов в промышленной автоматизации. Использование нейросетевой модели для обнаружения наблюдаемых выбросов позволяет решать задачу, которая ранее в

значительной степени зависела от визуального контроля персонала. Научная ценность данного результата состоит не только в применении нейронной сети, но и в постановке задачи промышленного мониторинга, формировании обучающей выборки, организации локализации источника выброса и разработке распределенной архитектуры обработки информации.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 1 статье – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus, кроме того в 1 материалах конференции, индексируемых в международной базе данных Scopus. Подана 1 заявка на патент (патент на полезную модель №219339 Российская Федерация, МПК C25C 3/14 (2006.01), опубл. 12.07.2023).

В совокупности результаты диссертации представляют собой законченную научно-техническую систему решений, направленную на повышение информированности АСУ ТП алюминиевого электролизера, снижение вероятности анодных эффектов и повышение оперативности контроля нарушений укрытия и выбросов.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость работы состоит в развитии подходов к автоматическому и косвенному контролю параметров алюминиевого электролизера как сложного технологического объекта. В диссертации уточнена связь между уровнем электролита, условиями растворения глинозема, концентрацией Al_2O_3 , низкочастотной составляющей напряжения и риском анодного эффекта. Эти положения могут быть использованы при дальнейшем развитии моделей и алгоритмов управления электролизными ваннами.

Практическая значимость результатов определяется возможностью применения разработанных решений в составе АСУ ТП алюминиевого производства. Многофункциональное пробойное устройство АПГ с оптическим дальномером и измерительной цепью постоянного тока позволяет автоматизировать контроль уровня электролита и факта пробития корки, уменьшить необходимость ручного вмешательства и локальной разгерметизации укрытий.

Разработанный алгоритм питания электролизной ванны практически значим тем, что может использоваться как дополнительный контур расчета интервала или дозы подачи глинозема. Это повышает точность поддержания концентрации глинозема в технологически допустимой области, снижает вероятность голодания ванны, образования осадка и возникновения анодного эффекта.

Существенное практическое значение имеет показанное автором уменьшение времени нахождения наконечника пробойного устройства в электролите. За счет этого уменьшаются термические и коррозионные воздействия на наконечник, повышается ресурс исполнительного устройства, снижается вероятность попадания стальных примесей в алюминий и сокращаются эксплуатационные затраты.

Система технического зрения для обнаружения видимых выбросов может использоваться как подсистема промышленного мониторинга электролизного цеха. Ее применение позволяет быстрее обнаруживать нарушения сплошности укрытия,

разгерметизацию, задымление и признаки нештатных ситуаций, что важно для экологического контроля, охраны труда и оперативности действий персонала.

Практическая значимость также подтверждается патентом на полезную модель, актом внедрения результатов в АО «СоюзЦМА», а также публикациями по теме диссертации. Представленные экономические расчеты показывают потенциальную эффективность предложенных решений, хотя для промышленного внедрения целесообразно дополнить их анализом чувствительности и оценкой совокупной стоимости владения.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать при модернизации систем автоматической подачи глинозема и подсистем автоматизированного контроля алюминиевых электролизеров с обожженными анодами. В первую очередь это относится к производствам, где сохраняется значительная доля ручного контроля уровня электролита, состояния корки и визуального наблюдения за выбросами.

Многофункциональное пробойное устройство может быть рекомендовано для опытно-промышленных испытаний в составе действующих АСУ ТП электролизного производства. При этом особое внимание следует уделить промышленной калибровке измерительного канала, проверке устойчивости оптического дальномера к загрязнению и термоциклированию, а также обеспечению электромагнитной совместимости измерительной цепи с высокоточковой системой электролизера.

Алгоритм питания электролизной ванны с учетом уровня электролита и косвенной оценки содержания глинозема целесообразно использовать как дополнительный аналитический модуль верхнего уровня АСУ ТП или как программную функцию, интегрируемую с существующими контроллерами АПГ. На начальном этапе внедрения алгоритм может работать в режиме советчика оператора с последующим переходом к автоматическому формированию корректирующих воздействий.

Результаты частотного анализа напряжения рекомендуется использовать для разработки виртуального датчика содержания глинозема. Для промышленного применения такого датчика необходима процедура адаптации модели к типу электролизера, току серии, криолитовому отношению, температуре электролита, состоянию анодного массива и особенностям конкретного производства.

Систему технического зрения рекомендуется использовать как подсистему экологического и технологического мониторинга электролизного корпуса. Перед промышленным внедрением целесообразно провести расширенные испытания на длительных видеопотоках с реальной освещенностью, запыленностью, парогазовой средой, вибрацией, присутствием персонала и технологического транспорта.

Материалы диссертации могут быть использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, связанных с цифровизацией алюминиевого производства, разработкой интеллектуальных подсистем АСУ ТП, созданием виртуальных датчиков, систем технического зрения и алгоритмов предупреждения анодных эффектов. Отдельные результаты представляют интерес для учебного процесса при подготовке специалистов по автоматизации технологических процессов, промышленным информационным системам и цифровым технологиям в металлургии.

7. Замечания и вопросы по работе

1. В диссертации приведены методика регистрации шумов напряжения и обработки сигналов методом быстрого преобразования Фурье, а также результаты экспериментального определения частотно-амплитудных признаков при различном содержании глинозема (с. 104–107, 116–128, 133–135, 170). Вместе с тем при промышленной эксплуатации на эти признаки будут одновременно влиять температура расплава, криолитовое отношение, плотность тока на аноде, межполюсное расстояние, состояние анодного массива и индивидуальные особенности конкретной ванны. В связи с этим необходимо пояснить, каким образом предполагается выполнять первичную калибровку и последующую адаптацию зависимости между низкочастотными характеристиками шумов напряжения и текущим содержанием глинозема при переходе от лабораторной установки к промышленным электролизерам.

2. Автоматическая система измерения уровня электролита с использованием модернизированного пневмоцилиндра АПГ, оптического дальномера и измерительной цепи постоянного тока описана в разделе 3.4 диссертации (с. 136–145), а экспериментальная проверка точности дальномера при температуре 110–125 °С приведена на с. 145–149. Однако для промышленного внедрения принципиальное значение имеет долговременная метрологическая устойчивость измерительного канала. Насколько предложенный алгоритм определения уровня электролита устойчив к длительному воздействию пыли, фторсодержащих соединений, вибрации, термоциклирования и возможного загрязнения оптического тракта в условиях реального электролизного цеха? Какие процедуры регламентной проверки и повторной калибровки автор считает необходимыми?

3. В работе показано, что расчет содержания глинозема и дозы питания связан с количеством электролита и необходимостью контроля его уровня (с. 22–23), а также что уровень металла изменяется вследствие наработки и слива алюминия (с. 60, 65, 139–140). В связи с этим необходимо пояснить, каким образом в предлагаемой системе предполагается разделять изменение уровня электролита, вызванное расходом и подпиткой электролита, и изменение уровня, связанное с наработкой и сливом металла. Это существенно для корректного расчета управляющего воздействия на систему подачи глинозема и фторсолей.

4. Система технического зрения, рассмотренная в главе 4, включает ряд элементов: лабораторный стенд и формирование набора изображений (с. 159–160), выбор нейросетевой модели `ssd_resnet50_v1_fpn_640x640_coco17_tpu-8` и вычислительной платформы NVIDIA Jetson (с. 160–162), а также результаты оценки точности обнаружения выбросов (с. 162–165, 169). Вместе с тем промышленная среда электролизного цеха характеризуется изменяющейся освещенностью, запыленностью оптики, тенями от оборудования, присутствием персонала и технологического транспорта. В работе отмечено, что автором выполнена проверка нейросетевой модели на сериях реальных цеховых видеоданных. Каковы результаты проверки? Как изменялись показатели качества распознавания по сравнению с лабораторной выборкой?

5. Программная часть системы технического зрения и расчета параметров питания представлена через отдельные алгоритмы, используемые библиотеки и элементы интерфейса (с. 133–135, 160–165, 168–169). Для промышленной эксплуатации было бы полезно подробнее раскрыть структуру программного обеспечения: уровни обработки данных, механизмы журналирования, контроль ошибочных и пропущенных данных, резервирование

вычислительных узлов, порядок обновления нейросетевой модели и сопровождения программного комплекса в условиях действующего производства.

6. В диссертации рассмотрены действующие АСУ ТП алюминиевого электролиза и их уровни управления (с. 73–76, 84–88, 90–93), а также предложена структурная схема разрабатываемой системы с датчиками, исполнительными устройствами, ПЛК, микроконтроллерами и протоколами передачи данных (с. 168–169). Вместе с тем архитектура включения новых подсистем в действующую цифровую инфраструктуру предприятия раскрыта недостаточно детально. Каким образом предполагается организовать интеграцию разработанных решений с существующими АСУ ТП: на уровне ПЛК, SCADA, серверов истории, MES или специализированного верхнего уровня аналитики? Какие данные должны передаваться между уровнями системы и какие протоколы обмена автор считает предпочтительными?

7. Экономический эффект от применения многофункционального пробойного устройства и системы технического зрения оценен в диссертации на с. 151–154 и 165–167. Вместе с тем практическая устойчивость такой оценки зависит от цены алюминия, фактического повышения эффективности тока, стоимости обслуживания датчиков, вычислительных модулей, камер и сетевой инфраструктуры. Выполнялся ли анализ чувствительности экономических показателей к изменению указанных исходных параметров, и какие факторы, по мнению автора, наиболее существенно влияют на срок окупаемости предложенных решений?

8. Есть редакционные замечания по тексту диссертации:

- с. 20: опечатка «где I – силат тока, A»; следует исправить на «где I – сила тока, A»;
- с. 22: в пояснении к формуле (1.27) дважды указано $Q_{эл}(t_0)$; во второй строке должно быть $Q_{гл}(t_0)$ – количество глинозема, растворенного в электролите;
- с. 38–39: в подписях к рисункам 1.12 и 1.13 написано «б) – продольное разрез»; следует исправить на «б) – продольный разрез»;
- с. 46: термин «перфторуглеры» следует заменить на корректный термин «перфторуглероды»;
- с. 61: фразу «система механизированного перемещение анодов» следует исправить на «система механизированного перемещения анодов»;
- с. 63: в подписи к рисунку 2.3 допущена опечатка «глиноземемом»; следует исправить на «глиноземом».

Высказанные замечания, в целом, не снижают научной и практической значимости выполненной работы.

Исследовательская работа в полной мере отвечает требованиям по актуальности, научной новизне, практической значимости, личному вкладу автора, отражению результатов в публикациях. Работа содержит все необходимые для кандидатской диссертации части и носит завершённый характер. Она написана хорошим техническим языком. Оформление диссертации выполнено на достаточно высоком уровне. Текст работы структурирован логично и последовательно, рисунки и таблицы хорошо иллюстрируют изложенные материалы. Список литературы включает актуальные и значимые источники по теме исследования. Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы.

8. Заключение по диссертации

Диссертация «Разработка автоматической системы сбора и обработки данных алюминиевого электролизера с использованием многофункционального пробойника и системы технического зрения», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор, **Шестаков Алексей Константинович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент
профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
доктор технических наук, доцент



Лавров Владислав Васильевич

25.05.2026г.

Тел.: +7 (343) 375-44-5, e-mail: v.v.lavrov@urfu.ru

Подпись Лаврова Владислава Васильевича заверяю:

УЧЕБНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УРФУ
МОРОЗОВА В.А.



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Адрес: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
Официальный сайт в сети Интернет: <https://urfu.ru/ru/>
Контактный телефон: 8-800-100-50-44
Адрес электронной почты: <https://urfu.ru/ru/>