

## Методологический анализ технологического процесса получения первичного алюминия

И. М. Новожилов<sup>1✉</sup>, Е. И. Капостей<sup>2</sup>, А. Н. Ильюшина<sup>3</sup>,  
О. А. Беляевский<sup>4</sup>, В. С. Хлопонина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский технический колледж управления и коммерции,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> ООО «ТЕХНОАВТОМАТИКА», г. Иркутск, Россия

✉ [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

**Аннотация.** Цель аналитического обзора состоит в получении представления об алюминиевой промышленности, автоматизации его получения. Вместе с тем проводится анализ принципов моделирования систем управления процессом получения алюминия, построения рабочих алгоритмов управления. Важная часть обзора посвящена изучению литературы по уже существующим исследованиям в области моделирования и разработкам таких систем. Электролиз алюминия остается сложным и многосвязным процессом и возможности применения новых комплексных моделей и методов очень высоки, что объясняется состоянием прогресса в данной сфере. Представленное научное исследование является отчетной публикацией по программе «Философия науки».

**Ключевые слова:** математическая модель, моделирование, алюминиевый электролизер, концептуальная модель получения алюминия, распределенные системы

**Для цитирования:** Методологический анализ технологического процесса получения первичного алюминия / И. М. Новожилов, Е. И. Капостей, А. Н. Ильюшина, О. А. Беляевский, В. С. Хлопонина // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 8. С. 14–27. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-14-27.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Methodological Analysis of the Technological Process of Primary Aluminum Production

I. M. Novozhilov<sup>1✉</sup>, E. I. Kapostey<sup>2</sup>, A. N. Ilyushina<sup>3</sup>,  
O. A. Belyaevsky<sup>4</sup>, V. S. Khloponina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Saint Petersburg Technical College of Management and Commerce,  
St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> «TECHNOAVTOMATIKA» Ltd., Irkutsk, Russia

✉ [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

**Abstract.** This analytical review is aimed at investigating the state of the aluminum industry and approaches to automation of aluminum production. An analysis of the principles of modeling such systems and developing

control algorithms is carried out. An important part of the review is devoted to the study of existing publications in the field of modeling and development of control systems for the aluminum production process. Extraction of aluminum by electrolysis remains a complex and multifaceted process, which requires new modeling approaches. The latter represents a promising development direction in this field. This work was carried out as part of the Philosophy of Science educational program.

**Keywords:** monitoring system, electromagnetic field, metallurgical furnace, aluminum electrolyzer

**For citation:** Methodological Analysis of the Technological Process of Primary Aluminum Production / I. M. Novozhilov, E. I. Kapostey, A. N. Ilyushin, O. A. Belyaevsky, V. S. Khloponin // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 8. P. 14–27. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-14-27.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Получение алюминия остается сложным и многосвязным процессом, и возможности применения новых комплексных моделей очень высоки. Изучение параметров электролиза алюминия началось еще в XVIII в., с тех пор процесс производства алюминия постепенно развивался. Переломным моментом стало изобретение Карла Вильгельма Содерберга в 1920 г. Технология получения алюминия с использованием возобновляемого электрода существенно удешевляла предыдущие методы. По всему миру распространился такой способ получения алюминия, и именно он был первым в алюминиевой промышленности России. В течение ста лет в технологии Содерберга [1] многое дорабатывалось и менялось. И по сей день ученые занимаются изучением этого процесса, разработкой усовершенствования технологии и выявлением новых зависимостей, поскольку все это необходимо для повышения экологической и экономической эффективности.

Определив важные параметры в работе электролизера, человек сможет более точно контролировать весь процесс, что позволит улучшить контроль сырья и качество управления. Сложность процесса электролиза объясняется тем, что нельзя рассматривать отдельный процесс обособленно от других, так как все технологические параметры тесно взаимосвязаны, поэтому к решению задачи необходимо подходить комплексно. Поскольку технологические параметры определяются экономическими, то текущее состояние дел и рентабельность завода во многом зависит от уровня используемой технологии, степени модернизации и способа производства алюминия [2].

Процесс производства алюминия в мире и в России не до конца автоматизирован, чем и определяются технологические задачи управления электролизером. Для определения задач отбираются основные параметры, получение которых

требует тотальной идентификации процесса, построения концептуальных и математических моделей. Следовательно, политика завода направляется на совершенствование уровней механизации и автоматизации. Технология моделирования этого процесса непрерывно совершенствуется, предлагая новые модели для все более сложных процессов выплавки.

**Поиск и классификация литературы.** Публикации, представленные в этом обзоре, можно разделить на две части, посвященные прогрессу в технологии производства алюминия и теории автоматического управления. В первой части был представлен ряд мер для повышения эффективности производства, в том числе проанализированы методы повышения экономической эффективности производства. В рамках экономической части исследования выбрана задача снижения себестоимости производства первичного алюминия. Во второй части исследования проанализированы современные системы и подсистемы автоматизированного управления технологическим процессом (АСУ ТП). Проведен анализ методов теории управления, применяемых в технологической цепочке получения первичного алюминия.

**Подсистема АСУ ТП.** Часть первых работ по математическому моделированию получения алюминия в электролизере касались отдельных его компонентов. По мере развития этого направления строились следующие математические модели: модель физических процессов, модель возникновения и развития анодных эффектов, модель напряжения, баланса электролизера и т. п.

В 1985 г. ученые представили проект [3] улучшения теплоизоляционных свойств футеровки в катодном резервуаре, т. е. возможного снижения теплопотерь. Предложенное изменение, состоящее в замене футеровки на боковой стороне резервуара с прерыванием теплового моста в области между нижним углом катодной шахты

и нижним углом катодного корпуса, было реализовано на практике. В этом же году в [4] приведен анализ энергетического баланса в алюминиевом электролизере с точки зрения описания параметров, способствующих оценке тепловых потерь через подину электролизера. Описана единая математическая модель, которая приводит к определению всех тепловых параметров электролизера, а именно перепада температуры на катоде в вертикальном направлении, плотности теплового потока, дополнительного тепла, выделяемого катодом, максимальной температуры и координаты точки на катоде, где эта температура достигается.

Совершенствование технологии производства алюминия имеет особое значение в цветной металлургии. Проектирование экономичных электролизеров, качественное и количественное улучшение производственных процессов невозможно без глубокого изучения электрических и тепловых полей. В 1986 г. группа ученых представила доклад «Математическое моделирование термоэлектрических процессов в алюминиевом электролизере» [5]. Основой для расчетов тепловых программ в алюминиевой промышленности сегодня служит метод теплового баланса. Однако этот метод не показывает распределения температуры по всей ванне, что чрезвычайно важно с практической точки зрения. Можно вывести общую систему уравнений для одновременного расчета электрического и теплового полей на основе концепций, базирующихся на термодинамике необратимых процессов. Термоэлектрическая модель была использована при расчете электрического поля для различных конструктивных решений стержня катодного токоподвода, и для него был выбран оптимальный материал. Также были проведены расчеты по улучшению теплоизоляции ванны. Внедрение результатов этого исследования в промышленный электролизер с током 155 кА улучшило его эксплуатационные характеристики.

В классическом процессе Холла–Эро алюминий получают в результате электролитического разложения оксида алюминия, растворенного в жидком криолите. Измерения трудно выполнять на работающих электролизерах из-за высокой температуры (приблизительно равной 960 °С) и химической коррозионной активности криолитического расплава; кроме того, повторное техническое перевооружение электролизера дорогостояще. По этой причине требуются математические модели гидродинамических процессов в электро-

лизере, и в 1987 г. В. Бояревичем была представлена «Mathematical Model Of MHD Processes In An Aluminum Electrolyzer» [6]. В этой статье рассматривается разработка модели Моро–Эванса, для ее обоснования используются оценки вклада отдельных членов в полные магнитогидродинамические (МГД) уравнения.

В дальнейшем в расчетах используются ранее предложенные математические модели и алгоритмы тепловых и электрических процессов в алюминиевом электролизере. В расчетах используются уже рассчитанные количественные соотношения текущих и геометрических параметров, которые совпадают с данными, полученными другими методами. Используемые модели надежны и могут быть пригодны при проектировании электрохимических аппаратов.

**Моделирование процесса.** В научных исследованиях до 1995 г. часто не учитывались влияния границ ванны, т. е. конечные размеры электролизера. Спустя некоторое время появились двумерные модели, которые исследовали устойчивость процесса в линейных и нелинейных случаях. Использование трехмерных уравнений существенно затрудняет процесс численных расчетов, но позволяет учесть вклад всех параметров процесса электролиза. В статье «Математическое моделирование физических полей в электролизере Содерберга» (1998 г.) описываются математические модели электрических, магнитных и гидродинамических полей (метод Моро–Эванса) [7]. Вычисления проводились с использованием следующих входных данных: распределение тока стержня, распределение тока стержня коллектора и индуцированные градиенты по периметру электролизера. Модели позволяют разрабатывать двумерные карты плотности тока анода, ванны, металла, катодного дна, а также индуцированных векторов в металле, схем течения металла и конфигурации границы металл–ванна. На основе экспериментальных данных о структуре потока металла разработан метод определения коэффициента сопротивления, который использовался при расчете скорости потока металла. Результаты вычислений показаны для конструкции электролизера С-8БМ.

В соответствии с изобретением [8] (1998 г.) управление электролизером включает ряд операций, некоторые из которых рассчитываются по математической модели: расчет сопротивления электролита и его среднего значения в межполюсном пространстве, расчет концентрации оксида алюминия в электролите. И в зависимости

от отклонения расчетного значения концентрации от заданного происходит изменение скорости подачи оксида алюминия в электролизер. Периодическая обработка корки электролита и последовательное измерение тока и напряжения осуществляется вручную. Корректировка математической модели происходит в моменты обработки корки электролита, далее по результатам измерения температуры электролита в интервалах между обработками происходит дополнительная корректировка. Для определения момента обработки корки высчитывается значение средней скорости изменения сопротивления, если оно превышает в течение 3–5 мин значение, заданное технологией, когда анод не перемещается. Расчет концентрации оксида алюминия проводится с периодичностью 5–10 мин с учетом усредненного значения тока серии в течение данного временного интервала. Изобретение позволяет повысить эффективность процесса.

Работа Т. В. Пискажовой и В. Х. Манна «Использование динамической модели алюминиевого электролизера» (2006) описывает применение этой математической динамической модели [9]. Программы на основе моделей используются для обучения персонала. Планируемые изменения параметров процесса сначала рассчитываются для выбора наилучшей практики, и в этой статье авторы приводят примеры таких расчетов, иллюстрированные графиками и диаграммами. Также предлагается описание применения модельной программы стабилизации криолитного соотношения и показана экономическая эффективность, полученная с ее помощью.

Построение математической модели на основе многомерных уравнений Навье–Стокса и системы Максвелла с учетом индуцированных токов – одна из возможностей повышения эффективности работы алюминиевых электролизеров [10]. С помощью специального пакета приложений реализуется данная модель, которая отражает динамику границы раздела жидкий металл–электролит для различных геометрий ячеек.

В статье «Двумерная и трехмерная математические модели электролиза алюминия» (2009 г.) авторами обсуждаются различные подходы к моделированию электролизера по восстановлению оксида алюминия [11]. Сравниваются две модели: первая основана на предположении, что расплавленный алюминий и криолит представляют собой две несмешивающиеся жидкости, которые вза-

имодействуют посредством вязкого трения, вторая – на двухфазном гетерогенном подходе. То же самое применимо для трехфазной многофазной смеси (оксид алюминия, электролит, пузырьки газа) – это приводит к более правильной модели. Приведена проверка усреднения трехмерной модели, основанной на низких вертикальных скоростях. Результаты вычислений, выполненных на разных моделях, показывают, что с самого начала работы редуцированной ячейки двухфазная модель правильна. Моделирование ячейки восстановления в реальном времени (с учетом геометрии) выполнялось в двумерном режиме.

Т. В. Пискажова на основе математической модели разработала методы управления технологическим процессом по технологии восстановления алюминия (2010 г.). Внедрение в производство представленных алгоритмов оптимальной стабилизации состава электролита и программы-симулятора процесса для поддержки принятия технологических решений дало экономический эффект [12].

В 2011 г. в исследовании [13] изучаются гидродинамические и электромагнитные процессы, обсуждается проблема электролиза алюминия. Разработанная математическая модель отвечает реальным конструктивным параметрам электролизера и условиям, в которых протекает процесс электролиза на производстве. Одновременно задействованы две среды: алюминий и электролит, поэтому моделирование объекта обладает высокой степенью адекватности – это объясняется совпадением результатов, приведенных с промышленного объекта, и численного расчета электролизера. Авторы наглядно продемонстрировали преимущества использования данной разработки. Она позволяет контролировать электролизную ванну, предотвращать неполадки, а также совершенствовать геометрию ванны и процесс управления электролизером, что повышает эффективность технологического процесса.

В [14] представлен один из методов разработки и проектирования недорогой системы моделирования электролизера, которая может быть применена для управления производством электролизера. Во-первых, исследуется структура системы моделирования электролизера. Система разделена на несколько модулей, включая загрузку сырья, рендеринг электролизной ванны, взаимодействие протекающих процессов, обнаружение столкновений и модуль визуализации данных. Все эти модули разработаны специально. Нако-

нец, представлены результаты, которые показывают, что метод выполним и действенен. Система моделирования электролизера использовалась в практических проектах для управления производством алюминия и обучения его производству.

Решение задач управления технологией завязано на моделировании технологического процесса, поэтому в 2013 г. В. М. Белолипецкий, Т. В. Пискажова представляют статью «Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия для решения задач управления технологией» [15], где рассматривается тепловая динамическая модель электролизера. На основе моделирования некоторых технологических событий представляются расчеты изменений технологических параметров после управляющих воздействий. В этом же году авторы публикуют монографию [16], в которой представлен обзор работ по математическому моделированию процесса электролитического получения алюминия. Описана динамическая математическая модель процесса производства алюминия и ее применение для разработки алгоритмов оптимального управления химическим составом электролита и алгоритмов программы «Виртуальный электролизер» для поддержки принятия технологических решений и моделирования реакции технологических переменных на управляющие и случайные воздействия. Он предназначен для инженеров, аспирантов и магистрантов, изучающих и использующих методы математического моделирования, воздействия.

В статье «Numerical simulation of the aluminum production» (2014 г.) П. А. Попов и П. Н. Вабишевич рассмотрели особенности научно-технических задач исследования на основе математического моделирования и вычислительного эксперимента [17]. Современные компьютерные технологии используются при модернизации и разработке новых технологий производства алюминия. Отмечены особенности математических моделей и программных приложений мультифизического моделирования алюминиевого электролизера.

В 2015 г. В. К. Фризоргером, Э. М. Гильдебрандтом, Е. П. Вершининой был проведен анализ «Мониторинг показателей работы алюминиевых электролизеров с анодом Содерберга» [18], где за основу взята работа одного из алюминиевых заводов Объединенной компании «РУСАЛ», в котором за продолжительный период времени рассматриваются основополагающие технико-

экономические показатели работы. Было выявлено, что процесс электролиза с анодом Содерберга в результате технического прогресса стал более эффективен. Также продемонстрированы перспективы развития метода при переходе к «коллоидному» аноду и обновленной конструкции электролизной ванны.

В 2017 г. коллектив ученых представил математическую модель [19] с высоким уровнем детализации описания исследуемых процессов, в которой также представлены результаты моделирования электролизера Содерберга для модельной задачи и для электролизера с несколькими анодами. Система уравнений Навье–Стокса используется для моделирования гидродинамики процесса электролиза. Распределение электромагнитных полей соответствует системе уравнений Максвелла. Рассмотрено влияние распределения электрического потенциала по аноду на МГД-стабильность процесса, а также дан сравнительный анализ численных экспериментов. В этом же году приводятся сведения о совершенствовании технологии электролиза и конструкций электролизеров в период с 1960 г. [20].

Компания «РУСАЛ» – один из крупнейших мировых производителей алюминия. Непрерывный анализ, разработка собственных новых технологий позволили компании сохранить свои лидирующие позиции в условиях жесткой конкуренции. Поддержка и развитие технических и технологических компонентов ОК «РУСАЛ» находятся под эгидой специально созданного бизнес-подразделения «РУСАЛ» ИТЦ (Инженерно-технологический центр), занимающегося исследованиями и разработкой технологии производства алюминия, разработкой новых восстановительных камер, технологий литья и машин, а также их модернизацией. Практически все исследования в различных областях для различных технических решений проходят стадию математического моделирования, которое позволяет проанализировать и оценить осуществимость предлагаемой инновации, а также выбрать наиболее оптимальный вариант с минимальными затратами. В 2019 г. в статье «Обзор применения математического моделирования в алюминиевом производстве компании РУСАЛ» [21] ученые представили примеры и возможности для основных направлений работы отдела математического моделирования, включая расчеты электрических, температурных, электромагнитных полей; газовой и гидродинамики; расчеты прочности, моделирования процессов литья и машин и т. д. с

целью совершенствования существующих технологий и повышения качества продукции.

При моделировании процесса важно учитывать три фазы: газ, электролит и металл. Взаимодействие этих сред отражается на магнитной гидродинамике и теплообмене в алюминиевом электролизере. В связи с этим проводятся численные эксперименты по изменению форм рабочего пространства, подтверждающие большую МГД-стабильность многоанодового электролизера, чем электролизера Содерберга [22]. Представленная модель отражает динамику границы раздела алюминий–электролит, что позволяет спрогнозировать изменение МГД-нестабильности, понижая потери выхода по току.

Одна из последних работ, опубликованная в 2022 г., – «Дискретная модель производства алюминия в Российской Федерации» С. И. Носкова [23]. В ней дан краткий обзор работ, связанных с математическим моделированием алюминиевой промышленности. В частности, анализируется влияние энергозатрат на конкурентоспособность в этой отрасли, изучается влияние деятельности алюминиевых заводов на окружающую среду, исследуются некоторые технологические аспекты производства алюминия, рассматривается использование различных методов идентификации в цветной металлургии. В качестве информационной основы исследования была использована официальная статистика за 2001–2020 гг.

**Взаимосвязанные параметры технологического процесса.** Для построения математической модели необходимо изучить взаимосвязанные параметры технологического процесса, влияние различных факторов и т. д. Множество научных исследований посвящено данной теме, накопленный опыт и знания помогают учесть все необходимое для дальнейшей деятельности. В диссертационной работе [24] А. П. Багаевой проведен анализ влияния различных параметров на срок службы алюминиевого электролизера. Зависимость роста температуры углеродистой футеровки была определена с помощью экспериментального измерения температуры при обжиге. В ходе исследования были созданы компьютерные программы и проведено численное и математическое моделирование теплофизического процесса, позволяющее определить особенности различных вариантов компоновки подины. В процессе анализа теплового баланса были определены режимы нагрева в зимнее время, влияние температуры окружающей среды и теплопотери.

Проблема недостатка измеряемых переменных поднимается в диссертации П. А. Петрова [25]. Для ее решения строится трехмерная математическая модель. Электролизер как объект управления переводится в класс полностью ненаблюдаемых. Благодаря переводу объекта расчеты осуществляются в достаточном объеме для дальнейшего расчета критерия качества управления процессом.

Глобальная тенденция в развитии алюминиевой промышленности связана с предпринимаемыми всеми ведущими компаниями попытками найти эффективные меры по увеличению срока службы электролизеров. Это объясняется тем фактом, что капитальный ремонт оказывается одним из самых дорогостоящих этапов в процессе производства алюминия. В 2009 г. В. В. Шарпова опубликовывает статью на тему: «Исследование взаимосвязи срока службы алюминиевого электролизера с коррозией его корпуса» [26]. Подтверждено, что алюминиевый корпус электролизера подвержен электрохимической коррозии. Установлено, что при взаимодействии попутных газообразных продуктов электролизера с корпусом электролизера происходит образование фторидов двух- и трехвалентного железа, а также фторидов железа нестехиометрического состава. Показано, что образовавшийся слой фтора не защищает поверхность корпуса от дальнейшей коррозии. Для защиты корпуса электролизера необходимо закрепить огнеупорный барьерный слой. Для поддержания оптимальной температуры нагрева корпуса следует использовать более надежную теплоизоляцию. Все это дает понять, что для оптимального функционирования и улучшения отдельных параметров электролизера необходимо поддерживать его состояние.

В 2011 г. С. И. Ножко представил «Способ определения производительности электролизеров для производства алюминия» [27], где классифицированы уже имеющиеся технологии диагностирования производительности алюминиевых электролизеров. Также продемонстрировано, что использование металл-индикаторного метода наиболее эффективно в условиях технологического процесса. В результате исследована диссоциация меди, получена формула для расчета производительности алюминиевых электролизеров, устанавливается подходящий вес смеси меди и необходимый объем отбора проб.

Для оптимизации параметров электролизера разрабатывается множество программ и методов,

которые касаются его энергетического баланса. Контролируя распределение и поддержание рабочего напряжения и температуры в определенном диапазоне, ученые изучили влияние разного рода факторов на данные показатели [28]. Результаты полученных экспериментов пригодны для будущих разработок по автоматическому управлению производством алюминия.

В [29] В. Ю. Бажиным и Н. Д. Шаховой (2015) исследуется алюминиевый электролизер как объект управления. Его входные и выходные параметры известны. В рамках процесса идентификации устанавливается взаимосвязь между этими параметрами и степенью их влияния на процесс в целом. Идентификация объекта осуществляется с использованием методов корреляционного и регрессионного анализа. Для более точного построения модели определяется оптимальный набор статистических данных.

Промышленный алюминиевый электролизер – это электрохимический реактор, который работает при высоких температурах и в условиях высокой коррозии. Однако эти условия ограничили измерение ключевых параметров управления, что делает контроль алюминиевых электролизеров сложной проблемой в промышленности. Поскольку системы управления электролизом алюминия оказывают существенное экономическое влияние, в [30] были проведены значительные исследования алгоритмов управления, систем управления и информационных систем для алюминиевых электролизеров. Эта статья сначала обобщает разработку систем управления, а затем фокусируется на прогрессе, достигнутом с 2000 г., включая контроль концентрации глинозема, температуры и молекулярного соотношения электролита, диагностику неисправностей, прогнозирование состояния электролизера и расширение системы управления. На основе этих исследований предложена концепция умной установки электролиза алюминия. Вводятся конструкция рамы, ключевые проблемы и текущий прогресс. Наконец, обсуждается несколько будущих направлений.

Программы «Blums v5.07 и MHD-Valdis» используются для математического моделирования и анализа различных параметров электролизера – так, с помощью данных средств в исследовании [31] были получены зависимости плотности горизонтальных токов и запаса МГД-стабильности от длины подовой настывли. В процессе эксплуатации электролизера высокие горизонтальные токи

возникают в двух случаях: в моменты 1 – уходящей под анод настывли; 2 – только что образовавшейся настывли, что дает понять, что для электролизера Содерберга вероятность возникновения МГД-нестабильности в первом случае ниже, чем во втором.

При производстве алюминия по технологии Содерберга с самообжигающимися анодами техническое обслуживание электролизера – важный и трудоемкий процесс. Обслуживание включает в себя перечень операций: разрушение корки электролита вокруг анода, подтягивание кусочков корки к плате, замешивание электролита для отделения углеродной пены, ее последующее удаление, герметизация боковых поверхностей анода электролитом для защиты его от окисления и загрузка другой порции оксида алюминия на вновь образованную электролитовую корочку. Во время этих операций специалисту приходится справляться с высоким температурным фоном, исходящим от электролита, а также, для соблюдения мер предосторожности, использовать защитную одежду, что создает дополнительные неудобства при выполнении работ. Эта проблема особенно остро стоит летом, и многие не выдерживают таких условий и увольняются, из-за чего на производстве образуется нехватка рабочих рук. В связи с этим требуется решить производственную задачу обеспечения мероприятий механизации технологических процессов [32].

Проблема стабильности электролизера Содерберга вновь поднимается в исследовании [33]. Для анализа МГД-электролизера был адаптирован к трехмерной математической модели, использующей многофазный подход к описанию среды (алюминий, электролит и газ), а также к гидродинамическим, электромагнитным, тепловым и электрохимическим процессам в ванне. Проведены тестовые расчеты, подтвердившие адекватность модели и наличие предложенных численных решений задачи с достаточной точностью. Было подтверждено, что электролизер Содерберга обладает меньшей стабильностью в магнитной гидродинамике, нежели многоанодовый электролизер.

Вопрос контроля электромагнитного поля электролизера очень важен в процессе промышленного производства алюминия. И. М. Новожилов и О. А. Беляевский в 2022 г. представили статью «Разработка информационной системы мониторинга электромагнитных полей электролизера Содерберга» [34]. В рамках этого исследования авторы анализируют электромагнитные поля расположения шин, гибких стояков и электролизеров

в целом. В результате получена информационная модель технического состояния электролизера и проведена серия экспериментов по оценке влияния тока на формирование электромагнитного поля. Разработанный программно-аппаратный комплекс для идентификации электромагнитного поля позволяет определить области их концентрации. В коллективной публикации «Анализ и идентификация электромагнитных полей пространственно распределенных систем управления» [35] также поднимается данный вопрос. Нарботки в сфере идентификации магнитного поля предоставляют все больше данных, необходимых для последующих технических решений.

Наиболее распространенным показателем эффективности управления процессом производства алюминия служит стоимость производства металла, но эта концепция включает в себя множество компонентов. Во-первых, стоимость сырья и электроэнергии в данном регионе, а также стоимость рабочей силы на тонну продукции, коэффициенты потребления сырья и энергии, капитальные затраты на строительство и ремонт, стоимость утилизации отходов, экологические платежи и т. д. В то же время, не существует единого функционала качества процесса в зависимости от технологических параметров, т. е. проблема полной и относительно строгой математической оптимизации процесса в целом в настоящее время неразрешима не только из-за его объема, но и из-за отсутствия полной модели эффективности. В [36] рассматриваются конкретные критерии эффективности, на улучшение которых направлена разработанная авторами оптимизационная модель управляющих воздействий, которые выбираются на основе возможных рычагов действующей АСУ ТП электролиза алюминия. Все тесты проводились на программном обеспечении виртуальной ячейки без переноса на реальный объект управления.

#### **Автоматическое управление процессом.**

Анализируя литературные источники по алюминиевой промышленности, можно прийти к выводу о том, что в данной сфере нельзя обойтись без математического моделирования, управления, контроля, регулирования. Всеми этими вопросами занимается теория автоматического управления. Существует огромное количество книг, статей, учебных пособий и прочего по данной научной дисциплине. Особое внимание уделяется той части из них, которая посвящена математическому моделированию, а также управлению по вы-

ходному параметру. В данном аналитическом обзоре упомянута лишь часть таких литературных источников.

А. Л. Ляшенко и И. М. Першин – авторы монографии «Частотный анализ и синтез с распределенными параметрами» [37], которая служит источником основной теоретической информации по построению математических моделей объектов и систем управления с распределенными параметрами. В данном издании особое внимание уделено рекомендациям по составлению математических моделей распределенных объектов, разработке алгоритмов и схем функционирования устройства, осуществляющего управление разрабатываемой системы. Подробно изложена информация о вопросах классификации основных методов моделирования объектов с распределенными параметрами (ОРП), передаточных функций ОРП (импульсных переходных функций, описания распределенных объектов на основе импульсных переходных функций, модального представления систем с распределенными параметрами), дискретных моделей объекта управления, частотного анализа объектов с распределенными параметрами с помощью обычных и расширенных частотных характеристик, определение области устойчивости систем и т. д.

Книга И. М. Першина «Анализ и синтез систем с распределенными параметрами» [38] посвящена общим принципам анализа и синтеза распределенных систем. В ней также рассматриваются методы определения гидродинамических параметров водоносных горизонтов и построение гидродинамических моделей гидролитосферных процессов, решение задач синтеза распределенных систем управления разными технологическими процессами, изучены и различные другие вопросы. Проблемы параметрической оптимизации и применение методов оптимизации при решении типовых задач управления поднимаются во многих работах Ю. В. Ильюшина, уникальных с точки зрения рассмотрения объектов и систем с общих позиций структурной теории распределенных систем [39], [40].

О. И. Золотов монографию «Управленческая парадигма Мира: математические аспекты» посвятил развитию математических аспектов так называемой управленческой парадигмы Мира, сформулированной А. Г. Бутковским и его школой [41]. В ней рассмотрены понятие «симметрия», дельтафункция в структурных тождествах симметрий и управлениях, методы теории управ-



ления физическими объектами, экстремум в математике, физике и управлении.

«Математическая теория конструирования систем управления» посвящена современной теории управления и разнообразным приложениям ее результатов, авторами которой являются В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский и В. Р. Носов [42]. Книга состоит из четырех частей и подробно рассматривает различные вопросы научной дисциплины ТАУ. Первая часть посвящена устойчивости управляемых систем, а именно непрерывным и дискретным детерминированным системам, устойчивости стохастических систем. Вторая часть касается темы «управление детерминированными системами» и рассматривает следующие вопросы: задачи управления, классическое вариационное исчисление в задачах оптимального управления, принцип максимума, линейные управляемые системы, метод динамического программирования и достаточные условия оптимизации, а также некоторые дополнительные вопросы теории оптимального управления. Третья часть – «Оптимальное управление динамическими системами при случайных возмущениях», четвертая посвящена расчету систем управления и рассмотрению численных методов исследования общих управляемых систем, численных методов решения задач оптимального управления и т. д.

**Обсуждение.** Таким образом, после исследования значительного числа литературных источников и, соответственно, идей, которые предлагаются для упрощения разработки математической модели, можно сделать вывод о том, что немногие из рассмотренных ранее вариантов представляют изучаемый аппарат в виде такой математической модели, которая бы наглядно отображала, что происходит в электролизере в процессе получения алюминия. Существующие модели описывают изменение различных параметров электролизера во времени: дифференциальное уравнение в частных производных, например в напряжении питания электролизной ванны или количестве выливаемого из электролизера металла. Однако для понимания данной модели необходимо разобраться в базисе – например в том, что значит каждая переменная, как определяются постоянные коэффициенты и т. д. Именно поэтому требуется уделить особое внимание разработкам комплексных математических моделей получения алюминия, отражающих расчет основных параметров и их изменение во взаимосвязи. На их основании могут быть созданы

виртуальные электролизеры, поскольку наглядность таких моделей намного выше. Будущие разработки значительно упростят проектирование и реконструкцию существующих электролизеров, так как все изменения будут явными и не потребуют каких-либо сложных вычислений, что в свою очередь сэкономит время на решение других сложных вопросов. К тому же, комплексная математическая модель, построенная во взаимосвязи гидродинамических, электромагнитных, тепловых и электрохимических процессов, а также в учете изменения геометрии ванны за счет процессов теплопереноса, позволит лучше понять столь сложный процесс получения алюминия.

**Заключение.** Принимая во внимание тенденции развития электролитической технологии производства первичного алюминия [43], можно прийти к выводу, что важность решения проблемы улучшения рабочих параметров анодных и катодных блоков будет только возрастать. Наилучшим методом ее решения признан комплексный подход, включающий как оптимизацию исходного сырья, так и введение дополнительных стадий в технологический процесс [44]–[48]. После испытания в промышленных условиях предложенных ранее методов можно выделить варианты, которые касались пропитки пеком и создания переменного сопротивления по длине блока, поскольку их применение улучшило эксплуатационные параметры объекта. В ходе эксперимента были собраны различные исторические данные о процессе электролизного производства алюминия в период с 1985 по 2022 гг. Из-за ошибок или человеческого фактора данные, собранные непосредственно в процессе производства, неизбежно приводят к ошибкам и шуму. Чтобы обеспечить стабильность системы, входные данные управления в реальном производстве ограничены определенным диапазоном, что позволяет поддерживать температуру и среднее напряжение электролизера в требуемом диапазоне.

В некоторых научных статьях упоминаются вопросы энергоэффективности, но основное внимание уделяется другому – например, разработке технологии или вычислительной модели. Снизить энергоемкость можно, внедряя как имеющиеся в настоящее время, так и новые меры повышения энергоэффективности. В будущем также может появиться перспектива достижения углеродно-нейтрального и не зависящего от угля электролиза. Однако для этого потребуются дальнейшие

исследования и разработка мер, обозначенных как новые или формирующиеся. Электролиз демонстрирует большее количество новых методов по сравнению с другими процессами, что также может быть объяснено высокой энергоемкостью. Во многих случаях представленные меры могут быть объединены, что подразумевает, что наилучшим решением должно быть объединение мер для достижения наибольшего повышения

энергоэффективности. Производство вторичного алюминия будет приобретать все большее значение для удовлетворения растущего спроса на алюминий. Для производства вторичного алюминия требуется всего 5 % энергии по сравнению с первичным алюминием. Это будет важно с точки зрения экологических, экономических проблем и повышения конкурентоспособности.

### Список литературы

1. Минцис М. Я., Сиразутдинов Г. А., Галевский Г. В. Электролизеры с анодом Содерберга и возможности их модернизации // Цветные металлы. 2010. № 12. С. 49–52.
2. World Steel and Metal News, Prices and Market Analysis Since 1913 – Metall Bulletin. URL: [www.metalbulletin.com](http://www.metalbulletin.com) (дата обращения: 16.03.2023).
3. Cernak L., Kafka R., Novak M. Matematicky model katodovej casti elektrolyzera na vyrobu hlinika // Hutnicke listy. 1985. Vol. 40, no. 9. P. 633–635.
4. Balu P., Ciucu V., Ciucu I. Modelarea matematica a aspectelor termice din catodul si straturile izolante ale cuvei de electroliza a aluminiului // Metalurgia Bucuresti. 1985. Vol. 37, no. 4. P. 199–201.
5. Mathematical modeling of thermoelectric processes in an aluminum electrolyzer / V. T. Ivanov, P. V. Polyakov, V. A. Kryukovskii, S. A. Shcherbinin // Dokl. Chem. technol. 1986. Vol. 289–291, no. 3. P. 127–129.
6. Boyarevich V. Mathematical Model of MHD processes in an aluminum electrolyzer // Magnetohydrodynamics New York, N.Y. 1987. Vol. 23, no. 1. P. 107–115.
7. Математические модели физических полей в электролизере Содерберга / О. Г. Проворова, В. В. Пингин, В. В. Овчинников, Т. В. Пискажова, Д. А. Горин // Магнитная гидродинамика. 1998. Т. 34. С. 375–385.
8. Пат. № 2106435 С1 РФ, МПК С25С 3/20. Способ управления алюминиевым электролизером: № 96121704/02 / Р. Г. Локшин, В. П. Ланкин, Н. А. Калужский; заявитель Акционерное общество открытого типа «Всероссийский алюминиево-магниевый институт». Заявл. 06.11.1996; опубл. 10.03.1998.
9. Piskazhova T. V. Mann V. C. The use of a dynamic aluminum cell model // JOM. 2006. Vol. 58, no. 2. P. 48–52.
10. Повышение эффективности электролиза алюминия с помощью математического моделирования / А. В. Алаторцев, Р. Н. Кузьмин, Н. П. Савенкова, О. Г. Проворова // Прикладная физика. 2007. № 4. С. 34–42.
11. Двумерная и трехмерная математические модели электролиза алюминия / Н. П. Савенкова, Р. Н. Кузьмин, О. Г. Проворова, А. В. Шобухов, С. В. Анпилов, С. А. Складчиков // Динамика сложных систем – XXI век. 2009. № 2. С. 53–59.
12. Пискажова Т. В. Методы эффективного управления технологическим процессом электролитического получения алюминия // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2010. Т. 3, № 2. С. 159–170.
13. Кузьмин Р. Н., Савенкова Н. П., Мокин А. Ю. Математическое моделирование промышленного электролиза алюминия // Фундаментальная и прикладная математика. 2009. Т. 15, № 6. С. 51–61.
14. Cai X., Zang K. Design and implementation of electrolyzer simulation system // Lecture Notes in Electrical Engin. 2013. Vol. 210. P. 247–254. doi: 10.1007/978-3-642-34528-9\_26.
15. Белолипецкий В. М., Пискажова Т. В. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия для решения задач управления технологией // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2013. № 4. С. 59–63.
16. Белолипецкий В. М., Пискажова Т. В. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия. Решение задач управления технологией. Сиб. федер. ун-т, 2013. 272 с.
17. Popov P. A., Vabishchevich P. N. Numerical simulation of the aluminum production // AIP Conf. Proc. Am. Institute of Physics Inc., 2014. Vol. 1629. P. 56–68.
18. Фризоргер В. К., Гильдебрандт Э. М., Вершинина Е. П. Мониторинг показателей работы алюминиевых электролизеров с анодом Содерберга // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2013. № 4. С. 11–14.
19. Three-dimensional mathematical modeling of dynamics interfaces between aluminum, electrolytes and reverse zone of oxidized metal depending on the potencial distribution / T. V. Piskazhova, N. P. Savenkova, N. P. Anpilov, A. V. Kalmykov, F. S. Zaitsev, F. A. Anikeev // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2017. Vol. 10, no. 1. P. 59–73.
20. Совершенствование технологии электролиза и конструкции электролизеров в производстве алюминия / В. А. Крюковский, Г. А. Сиразутдинов, М. Я. Минцис, П. В. Поляков // Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч., Новокузнецк, 15–16 нояб. 2017 г. Новокузнецк: Сибирский гос. индустриальный ун-т, 2017. С. 44–48.
21. Обзор применения математического моделирования в алюминиевом производстве компании РУСАЛ / Я. А. Третьяков, А. Б. Ключанцев, М. М. Морозов, Е. Ю. Радионов, А. А. Ильин, В. В. Коробко, А. А. Пьяных // Цветные металлы и минералы: сб. докл. XI междунар. конгресса, Красноярск, 16–20 сент. 2019 г. Красноярск: Общество с ограниченной ответ-

стvenностью «Научно-инновационный центр», 2019. С. 231–245.

22. Математическое моделирование МГД-стабильности алюминиевого электролизера / Н. П. Савенкова, А. Ю. Мокин, Н. С. Удовиченко, А. А. Пьяных // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2020. Т. 13, № 2. С. 243–253. doi: 10.17516/1999-494X-0211.

23. Носков С. И. Дискретная модель производства алюминия в Российской Федерации // Вестн. Технол. ун-та. 2022. Т. 25, № 2. С. 80–82. doi: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_2\_80.

24. Багаева А. П. Влияние технологических параметров на срок службы алюминиевого электролизера: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2001. 126 с.

25. Петров П. А. Управление процессом электролитического получения алюминия с использованием алгоритма расчета ненаблюдаемых параметров: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 190 с.

26. Sharapova V. V. Study of the interconnection of aluminum electrolyzer life with corrosion of its casing // Refractories and Industrial Ceramics. 2009. Vol. 50, no. 1. P. 49–51.

27. Ножко С. И. Способ определения производительности электролизера для производства алюминия // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2011. № 1. С. 18–21.

28. Сысоев И. А., Ершов В. А., Кондратьев В. В. Метод управления энергетическим балансом электролизеров для производства алюминия // Металлург. 2015. № 6. С. 70–76.

29. Шахова Н. Д., Бажин В. Ю. Идентификация объекта с определением необходимого объема данных на примере алюминиевого электролизера // Тр. X Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления». М.: Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2015. С. 419–426.

30. Душин С. Е., Красов А. В., Литвинов Ю. В. Моделирование систем и комплексов. СПб.: Санкт-Петербургский нац. исследовательский ун-т информ. технологий, механики и оптики, 2010. 177 с.

31. Немчинова Н. В., Радионов Е. Ю., Сомов В. В. Исследование влияния формы рабочего пространства на МГД-параметры работы электролизера при производстве алюминия // Вестн. Иркутского гос. техн. ун-та. 2019. Т. 23, № 1(144). С. 169–178. doi: 10.21285/1814-3520-2019-1-169-178.

32. Коновалов Ю. И., Грохотова А. А., Банщикова Н. С. Механизация процессов технологического обслуживания электролизеров // Механика XXI веку. 2020. № 19. С. 179–183.

33. Savenkova N. P., Mokin A. Yu, Udovichenko N. S. The MHD stability investigation of an aluminum electrolyzer under various process conditions // J. of Physics Conf. Series. 2020. 1560 (1). P. 1–4. doi: 10.1088/1742-6596/1560/1/012068.

34. Новожилов И. М., Беляевский О. А. Разработка информационной системы мониторинга электромагнитных полей электролизера Содерберга // Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем. Сб. докл. Междунар. конф. СПб.:

СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2022. С. 37–39.

35. Анализ и идентификация электромагнитных полей пространственно распределенных систем управления / И. М. Новожилов, О. А. Беляевский, Ю. В. Ильюшин, Т. В. Кухарова, Е. М. Михайлова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 2. С. 41–50. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-41-50.

36. Makeev A. V., Piskazhova T. V., Gofman P. M. Optimization control actions for the electrolytic method of aluminium producton // Siberian J. of Sci. and Technol. 2020. Vol. 21, no. 3. P. 314–322. doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-314-322.

37. Ляшенко А. Л., Першин И. М. Частотный анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Изд-во РИА-КМВ, 2012. 152 с.

38. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами Пятигорск: Рекламно-информ. агентство на КМВ, 2007. 243 с.

39. Ильюшин Ю. В. Методы импульсного управления объектами с распределенными параметрами: дис. ... канд. техн. наук. Пятигорск, 2012. 170 с.

40. Анализ и идентификация тепловых полей пространственно распределенных систем управления / М. Ю. Шестопалов, И. М. Новожилов, А. Н. Ильюшина, Ю. В. Ильюшин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 9. С. 61–71.

41. Золотов О. И., Пустыльников Л. М. Управленческая парадигма Мира: математические аспекты / СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. СПб., 2012. 416 с.

42. Афанасьев В. Н., Колмановский В. Б., Носов В. Р. Математическая теория конструирования систем управления: учеб. для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 2003. 614 с.: ил.

43. Хлопонина В. С. Анализ современного состояния и пути повышения эффективности процесса воспроизводства минерально-сырьевой базы Российской Федерации // Зап. Горного ин-та. 2012. Т. 195. С. 216–221.

44. Analytical review of the foreign publications about the methods of rise of operating parameters of cathode blocks during 1995–2014 / R. Yu. Feshchenko, O. O. Erokhhina, A. L. Kvanin, D. S. Lutskiy, V. V. Vasilyev // CIS Iron and Steel Review. 2017. Vol. 13. P. 48–52.

45. Разработка комплексной математической модели получения алюминия в электролизере Содерберга / И. М. Новожилов, С. Е. Абрамкин, О. А. Беляевский, Е. И. Капустей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 9. С. 12–30. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-12-30.

46. Ильюшин Ю. В., Холева Д. Н. Анализ проблем, возникающих при производстве алюминия методом электролиза // Сб. тр. XXII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, студентов и аспирантов. СПб.: ПГУПС Императора Александра I. ООО «Медиапапир», 2022. С. 151–155.

47. Ильюшин Ю. В., Шестопалов М. Ю. Применение модифицированного критерия Найквиста для

анализа импульсных распределенных систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 3. С. 42–46.

48. Ильюшин Ю. В., Новожилов И. М. Математические модели объектов с распределенными пара-

метрами с импульсным входным воздействием // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 4. С. 48–52.

### Информация об авторах

**Новожилов Игорь Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

**Капустей Екатерина Ивановна** – магистрант Санкт-Петербургского горного университета.

E-mail: kapostey@yandex.ru

**Ильюшина Алена Николаевна** – преподаватель специальных дисциплин Санкт-Петербургского технического колледжа управления и коммерции.

E-mail: lilyliya@mail.ru

**Беляевский Олег Александрович** – ведущий инженер ООО «ТЕХНОАВТОМАТИКА», ул. Октябрьской Революции, стр. 20в, Иркутск, 664007, Россия.

E-mail: vost-sibenergo@yandex.ru

**Хлопонина Вера Сергеевна** – канд. экон. наук, главный ученый секретарь Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В.О., 199106, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: Khloponina\_VS@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9029-2788>

### References

1. Mincis M. Ja., Sirazutdinov G. A., Galevskij G. V. Jelektrolizery s anodom Soderberga i vozmozhnosti ih modernizacii // Cvetnye metally. 2010. № 12. S. 49–52. (In Russ.).

2. World Steel and Metal News, Prices and Market Analysis Since 1913 – Metall Bulletin. URL: [www.metalbulletin.com](http://www.metalbulletin.com) (data obrashhenija: 16.03.2023).

3. Cernak L., Kafka R., Novak M. Matematicky model katodovej casti elektrolyzera na vyrobu hlinika // Hutnicke listy. 1985. Vol. 40, no. 9. P. 633–635.

4. Balu P., Ciucu V., Ciucu I. Modelarea matematica a aspectelor termice din catodul si straturile izolante ale cuvei de electroliza a aluminului // Metalurgia Bucuresti. 1985. Vol. 37, no. 4. P. 199–201.

5. Mathematical modeling of thermoelectric processes in an aluminum electrolyzer / V. T. Ivanov, P. V. Polyakov, V. A. Kryukovskii, S. A. Shcherbinin // Dokl. Chem. technol. 1986. Vol. 289–291, no. 3. P. 127–129.

6. Boyarevich V. Mathematical Model Of MHD Processes In An Aluminum Electrolyzer. // Magneto-hydrodynamics New York, N.Y. 1987. Vol. 23, no. 1. P. 107–115.

7. Matematicheskie modeli fizicheskikh polej v jelektrolizere Soderberga / O. G. Provorova, B. B. Pingin, B. B. Ovchinnikov, T. V. Piskazhova, D. A. Gorin // Magnitnaja gidrodinamika. 1998. T. 34. S. 375–385. (In Russ.).

8. Pat. 2106435 C1 RF, MPK C25C 3/20. Sposob upravlenija aljuminievym jelektrolizerom / R. G. Lokshin, V. P. Lankin, N. A. Kaluzhskij; javitel' Akcionernoe obshhestvo otkrytogo tipa «Vserossijskij aljuminievo-

magnievij institute». № 96121704/02. Zajavl. 06.11.1996: opubl. 10.03.1998 (In Russ.).

9. Piskazhova T. V. Mann V. C. The use of a dynamic aluminum cell model // JOM. 2006. Vol. 58, no. 2. P. 48–52. (In Russ.).

10. Povyshenie jeffektivnosti jelektroliza aljuminija s pomoshh'ju matematicheskogo modelirovanija / A. V. Alatorcev, R. N. Kuz'min, N. P. Savenkova, O. G. Provorova // Prikladnaja fizika. 2007. № 4. S. 34–42. (In Russ.).

11. Dvumernaja i trehmernaja matematicheskie modeli jelektroliza aljuminija / N. P. Savenkova, R. N. Kuz'min, O. G. Provorova, A. V. Shobuhov, S. V. Anpilov, S. A. Skladchikov // Dinamika slozhnyh sistem – XXI vek. 2009. № 2. S. 53–59. (In Russ.).

12. Piskazhova T. V. Metody jeffektivnogo upravlenija tehnologicheskim processom jelektroliticheskogo poluchenija aljuminija // Zhurn. Sib. feder. un-ta. Ser.: Tehnika i tehnologii. 2010. T. 3, № 2. S. 159–170. (In Russ.).

13. Kuz'min R. N., Savenkova N. P., Mokin A. Ju. Matematicheskoe modelirovanie promyshlennogo jelektroliza aljuminija // Fundamental'naja i prikladnaja matematika. 2009. T. 15, № 6. S. 51–61. (In Russ.).

14. Cai X., Zang K. Design and implementation of electrolyzer simulation system // Lecture Notes in Electrical Engin. 2013. Vol. 210. P. 247–254. doi: 10.1007/978-3-642-34528-9\_26.

15. Belolipeckij V. M., Piskazhova T. V. Matematicheskoe modelirovanie processa jelektroliticheskogo

poluchenija aljuminija dlja reshenija zadach upravlenija tehnologij // *Izv. vuzov. Cvetnaja metallurgija*. 2013. № 4. S. 59–63. (In Russ.).

16. Belolipeckij V. M., Piskazhova T. V. Matematicheskoe modelirovanie processa jelektroliticheskogo poluchenija aljuminija. Reshenie zadach upravlenija tehnologij. Sib. feder. un-t, 2013. 272 s. (In Russ.).

17. Popov P. A., Vabishchevich P. N. Numerical simulation of the aluminum production // *AIP Conf. Proc. Am. Institute of Physics Inc.*, 2014. Vol. 1629. P. 56–68.

18. Frizorger V. K., Gil'debrandt Je. M., Vershinina E. P. Monitoring pokazatelej raboty aljuminievyh jelektrolizerov s anodom Soderberga // *Izv. vuzov. Cvetnaja metallurgija*. 2013. № 4. S. 11–14. (In Russ.).

19. Three-dimensional mathematical modeling of dynamics interfaces between aluminum, electrolytes and reverse zone of oxidized metal depending on the potencial distribution / T. V. Piskazhova, N. P. Savenkova, N. P. Anpilov, A. V. Kalmykov, F. S. Zaitsev, F. A. Anikeev // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2017. Vol. 10, no. 1. P. 59–73.

20. Sovershenstvovanie tehnologii jelektroliza i konstrukcii jelektrolizerov v proizvodstve aljuminija / V. A. Krjukovskij, G. A. Sirazutdinov, M. Ja. Mincis, P. V. Poljakov // *Metallurgija: tehnologii, innovacii, kachestvo: tr. XX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 2 ch., Novokuzneck, 15–16 nojab. 2017 g. Novokuzneck: Sibirskij gos. industrial'nyj un-t*, 2017. S. 44–48. (In Russ.).

21. Obzor primenenija matematicheskogo modelirovanija v aljuminievom proizvodstve kompanii RUSAL / Ja. A. Tret'jakov, A. B. Kljuchancev, M. M. Morozov, E. Ju. Radionov, A. A. Il'in, V. V. Korobko, A. A. P'janyh // *Cvetnye metally i mineraly.: sb. dokl. XI mezhdunar. kongressa, Krasnojarsk, 16–20 sent. 2019 g. Krasnojarsk: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju «Nauchno-innovacionnyj centr»*, 2019. S. 231–245. (In Russ.).

22. Matematicheskoe modelirovanie MGD-stabil'nosti aljuminievogo jelektrolizera / N. P. Savenkova, A. Ju. Mokin, N. S. Udovichenko, A. A. P'janyh // *Zhurn. Sib. feder. un-ta. Ser.: Tehnika i tehnologii*. 2020. T. 13, № 2. S. 243–253. doi: 10.17516/1999-494X-0211. (In Russ.).

23. Noskov S. I. Diskretnaja model' proizvodstva aljuminija v Rossijskoj Federacii // *Vestn. Tehnol. un-ta*. 2022. T. 25, № 2. S. 80–82. doi: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_2\_80. (In Russ.).

24. Bagaeva A. P. Vlijanie tehnologicheskikh parametrov na srok sluzhby aljuminievogo jelektrolizera: dis. ... kand. tehn. Nauk. Krasnojarsk, 2001. 126 s. (In Russ.).

25. Petrov P. A. Upravlenie processom jelektroliticheskogo poluchenija aljuminija s ispol'zovaniem algoritma rascheta nenabljudajemykh parametrov: dis. ... kand. tehn. nauk. SPb., 2009. 190 s. (In Russ.).

26. Sharapova V. V. Study of the interconnection of aluminum electrolyzer life with corrosion of its casing // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2009. Vol. 50, no. 1. P. 49–51.

27. Nozhko S. I. Sposob opredelenija proizvoditel'nosti jelektrolizera dlja proizvodstva aljuminija // *Izv. vuzov. Cvetnaja metallurgija*. 2011. № 1. S. 18–21. (In Russ.).

28. Sysoev I. A., Ershov V. A., Kondrat'ev V. V. Metod upravlenija jenergeticheskim balansom jelektrolizerov dlja proizvodstva aljuminija // *Metallurg*. 2015. № 6. S. 70–76. (In Russ.).

29. Shahova N. D., Bazhin V. Ju. Identifikacija ob#ekta s opredeleniem neobhodimogo ob#ema dannyh na primere aljuminievogo jelektrolizera // *Tr. X Mezhdunar. konf. «Identifikacija sistem i zadachi upravlenija»*. M.: In-t problem upravlenija im. V. A. Trapeznikova RAN, 2015. S. 419–426. (In Russ.).

30. Dushin S. E. Krasov A. V., Litvinov Ju. V. Modelirovanie sistem i kompleksov. SPb.: Sankt-Peterburgskij nac. issledovatel'skij un-t inform. tehnol., mehaniki i optiki, 2010. 177 s. (In Russ.).

31. Nemchinova N. V., Radionov E. Ju., Somov V. V. Issledovanie vlijanija formy rabocheho prostranstva na MGD-parametry raboty jelektrolizera pri proizvodstve aljuminija // *Vestn. Irkutskogo gos. tehn. un-ta*. 2019. T. 23, № 1(144). S. 169–178. doi: 10.21285/1814-3520-2019-1-169-178. (In Russ.).

32. Konovalov Ju. I., Grohotova A. A., Banshnikova N. S. Mehanizacija processov tehnologicheskogo obsluzhivaniya jelektrolizerov // *Mehaniki XXI veku*. 2020. № 19. S. 179–183. (In Russ.).

33. Savenkova N. P., Mokin A. Yu., Udovichenko N. S. The MHD stability investigation of an aluminum electrolyzer under various process conditions // *J. of Physics Conf. Series*. 2020. 1560 (1). P. 1–4. doi: 10.1088/1742-6596/1560/1/012068. (In Russ.).

34. Novozhilov I. M., Beljaevskij O. A. Razrabotka informacionnoj sistemy monitoringa jelektromagnitnyh polej jelektrolizera Soderberga // *Proektirovanie i obespechenie kachestva informacionnyh processov i sistem // Sb. dokl. Mezhdunar. konf. SPb.: SPbGJeTU «LJeTI» im. V. I. Ul'janova (Lenina)*, 2022. S. 37–39. (In Russ.).

35. Analiz i identifikacija jelektromagnitnyh polej prostranstvenno raspredelennyh sistem upravlenija / I. M. Novozhilov, O. A. Beljaevskij, Ju. V. Il'jushin, T. V. Kuharova, E. M. Mihajlova // *Izv. SPbGJeTU «LJeTI»*. 2022. T. 15, № 2. S. 41–50. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-41-50. (In Russ.).

36. Makeev A. V., Piskazhova T. V., Gofman P. M. Optimization control actions for the electrolytic method of aluminium producton // *Siberian J. of Sci. and Technol*. 2020. Vol. 21, no. 3. P. 314–322. doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-314-322. (In Russ.).

37. Ljashenko A. L., Pershin I. M. Chastotnyj analiz i sintez sistem s raspredelennymi parametrami. Pjatigorsk: Izd-vo RIA-KMV, 2012. 152 s. (In Russ.).

38. Pershin I. M. Analiz i sintez sistem s raspredelennymi parametrami Pjatigorsk: Reklamno-inform. agentstvo na KMV, 2007. 243 s. (In Russ.).

39. Il'jushin Ju. V. Metody impul'snogo upravlenija ob#ektami s raspredelennymi parametrami: dis. ... kand. tehn. nauk. Pjatigorsk, 2012. 170 s. (In Russ.).

40. Analiz i identifikacija teplovyh polej prostranstvenno raspredelennyh sistem upravlenija / M. Ju. Shestopalov, I. M. Novozhilov, A. N. Il'jushina, Ju. V. Il'jushin // *Izv. SPbGJeTU «LJeTI»*. 2021. № 9. S. 61–71. (In Russ.).

41. Zolotov O. I., Pustyl'nikov L. M. Upravlencheskaja paradigma Mira: matematicheskie aspekty / SPbGUT im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha. SPb., 2012. 416 s. (In Russ.).

42. Afanas'ev V. N., Kolmanovskij V. B., Nosov V. R. Matematicheskaja teorija konstruirovaniya sistem upravlenija: Ucheb. dlja vuzov. 3-e izd., ispr. i dop. M.: Vyssh. shk., 2003. 614 s.: il. (In Russ.).

43. Hloponina V. S. Analiz sovremennoho sostojanija i puti povyshenija jeffektivnosti processa vosproizvodstva mineral'no-syr'evoj bazy Rossijskoj Federacii // Zap. Gornogo in-ta. 2012. T. 195. S. 216–221. (In Russ.).

44. Analytical review of the foreign publications about the methods of rise of operating parameters of cathode blocks during 1995–2014 / R. Yu. Feshchenko, O. O. Erokhina, A. L. Kvanin, D. S. Lutskiy, V. V. Vasilyev // CIS Iron and Steel Review. 2017. Vol. 13. P. 48–52.

45. Razrabotka kompleksnoj matematicheskoj modeli poluchenija aljuminija v jelektrolizere Soderberga

/ I. M. Novozhilov, S. E. Abramkin, O. A. Beljaevskij, E. I. Kapostej // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2022. T. 15, № 9. S. 12–30. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-12-30. (In Russ.).

46. Il'jushin Ju. V., Holeva D. N. Analiz problem, voznikajushhih pri proizvodstve aljuminija metodom jelektroliza // Sb. tr. XXII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodyh uchenyh, studentov i aspirantov. SPb.: PGUPS Imperatora Aleksandra I. OOO «Mediapapir», 2022. S. 151–155. (In Russ.).

47. Il'jushin Ju. V., Shestopalov M. Ju. Primenenie modifitsirovannogo kriterija Najkvista dlja analiza impul'snyh raspredelennyh sistem // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2019. № 3. S. 42–46. (In Russ.).

48. Il'jushin Ju. V., Novozhilov I. M. Matematicheskie modeli ob#ektov s raspredelennymi parametrami s impul'snym vhodnym vozdeystviem // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2019. № 4. S. 48–52. (In Russ.).

#### Information about the authors

**Igor M. Novozhilov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

**Ekaterina I. Kapostey** – Master's student at St. Petersburg Mining University.

E-mail: [kapostey@yandex.ru](mailto:kapostey@yandex.ru)

**Alena N. Il'yushina** – Lecturer of special disciplines of the St. Petersburg Technical College of Management and Commerce.

E-mail: [lilyliya@mail.ru](mailto:lilyliya@mail.ru)

**Oleg A. Belyaevsky** – Leading Engineer of «TECHNOAUTOMATICS» LLC, Oktyabrskoj Revolyutsii st., 20b, Irkutsk, 664007, Russia.

E-mail: [vost-sibenergo@yandex.ru](mailto:vost-sibenergo@yandex.ru)

**Vera S. Khloponina** – Cand. Sci. (Econ.), Chief Scientific Secretary of Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: [Khloponina\\_VS@pers.spmi.ru](mailto:Khloponina_VS@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-9029-2788>

Статья поступила в редакцию 26.06.2023; принята к публикации после рецензирования 03.07.2023; опубликована онлайн 19.10.2023.

Submitted 26.06.2023; accepted 03.07.2023; published online 19.10.2023.