

УДК 004.021
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4613
Шифр специальности ВАК: 2.4.2

Создание интеллектуальной системы управления для технологических комплексов предприятий алюминиевой промышленности

Н.М. Зайцева¹, И.Ю. Семькина²✉

¹Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар,

²Севастопольский государственный университет, Россия, г. Севастополь

✉ arinasemykina@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Алюминиевая промышленность является одной из значимых мировых отраслей и отличается высокой экологической нагрузкой, ресурсоемкостью и энергоемкостью. Для снижения негативного влияния алюминиевого производства ведутся работы по совершенствованию его технологических процессов, нацеленные на повышение доли извлечения алюминия, снижение объемов отходов и снижение энергозатрат. Задача снижения энергоемкости производства решается в том числе за счет внедрения систем управления энергопотреблением. В силу сложности и многосвязности технологических процессов производства алюминия для таких систем управления неэффективно применение традиционных линейных подходов и требуется построение адекватных математических моделей. При этом на уровне производства использование математических моделей, опирающихся на феноменологическое описание протекающих физических процессов, чрезмерно усложняет задачу управления, вследствие чего актуальным является использование интеллектуальных и адаптивных подходов и к построению моделей технологических процессов, и к решению задач оптимального управления энергопотреблением. **Объекты:** технологические комплексы предприятий алюминиевой промышленности, обладающие свойствами инерционности, нелинейности и замкнутости; система управления на основе методов искусственного интеллекта. В качестве иллюстрации выбрано производство глинозема. **Цель:** разработка моделей, способных адекватно описывать взаимосвязанные процессы, протекающие в рассматриваемых технологических комплексах, а также разработка системы управления, позволяющей решать задачи оптимального управления энергопотреблением. **Методы:** для моделирования технологических процессов производства алюминия на основе балансовых уравнений в условиях неопределенности применена теория нечетких множеств, а также метод градиентного спуска для идентификации параметров модели; в задачах оптимизации использован метод генетического алгоритма. **Результаты.** Разработаны модель баланса материальных потоков и модель изменения технологических режимов, определяющие энергопотребление технологических комплексов предприятия алюминиевой промышленности с непрерывным инерционным нелинейным замкнутым производством. На базе полученных моделей определены динамические характеристики энергопотребления, а также параметры протекания технологических процессов в зависимости от основных управляемых параметров, что позволяет предсказывать аварийные ситуации. Решена оптимизационная задача управления энергопотреблением непрерывного производства с учетом технологических параметров и стоимостных факторов.

Ключевые слова: производство алюминия, управление энергопотреблением, моделирование в условиях неопределенности, оптимальное управление, нечеткие множества, генетический алгоритм

Для цитирования: Зайцева Н.М., Семькина И.Ю. Создание интеллектуальной системы управления для технологических комплексов предприятий алюминиевой промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 119–132. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4613

UDC 004.021

DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4613

Intelligent control system for technological complexes of aluminum industry enterprises

N.M. Zaytseva¹, I.Yu. Semykina²✉

¹ Toraygyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

² Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

✉ arinasemykina@gmail.com

Abstract. Relevance. Aluminum production is one of the most important industries all over the world. It has a high environmental load, resource and energy intensity. To reduce the negative impact of aluminum production, efforts are underway to improve its technological processes, aimed at increasing aluminum recovery rates, reducing waste volumes, and lowering energy consumption. The reduction of energy consumption can be achieved, among others, through implementing control systems that provide energy management. Due to the complexity and multiplicity of technological processes in aluminum production, the use of traditional linear approaches for such control systems is ineffective, and adequate mathematical models are required. At the same time, for the production level, the use of mathematical models based on a phenomenological description of the ongoing physical processes overly complicates the control task. As a result, the use of intelligent and adaptive approaches to both the mathematical description of technological processes and the optimal energy consumption management is relevant. **Objects.** Technological complexes of aluminum production, which have the properties of inertia, nonlinearity, and closedness; and the control system based on artificial intelligence methods. Alumina production is chosen as an illustration. **Aim.** To develop mathematical models capable of adequately describing the interrelated processes in the technological complexes under consideration, as well as the control system that allows optimal energy consumption management. **Methods.** For the mathematical model based on balance equations under uncertainty, the fuzzy-set theory was used along with the gradient descent method to identify the model parameters; for the optimization task, the genetic algorithm method was used. **Results.** The mass balance model and the process conditions changing model have been developed to determine the energy consumption for the technological complexes of aluminum production with continuous inertial nonlinear closed production. Based on these models, the dynamic characteristics of energy consumption and the parameters of technological processes were determined depending on the main controlled parameters, allowing us to predict emergencies. Considering technological parameters and cost factors, the optimization task for energy consumption management was solved.

Keywords: aluminum production, energy consumption management, modeling under uncertainty, optimal control, fuzzy set, genetic algorithm

For citation: Zaytseva N.M. Semykina I.Yu. Intelligent control system for technological complexes of aluminum industry enterprises. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 119–132. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4613

Введение

Производство алюминия имеет критическую важность для мировой экономики как сырье для современной строительной промышленности, легкового и железнодорожного транспорта, авиастроения, производства электрооборудования.

Наиболее часто алюминий извлекают из бокситов, добываемых на крупных карьерах [1–3], которые обрабатывают горячими растворами щелочей по методу Байера, с получением в результате гидроксидов алюминия и красного шлама, являющегося опасным отходом [4]. Ежегодный прирост мировых объемов свалок красного шлама оценивается в $120 \cdot 10^6$ т, что близко к годовому мировому производству первичного алюминия [5].

Следующей стадией производства является получение глинозема, для чего гидроксиды алюминия отделяют, высушивают и кальцинируют. Среднемировой уровень электропотребления при этом около 6000 кВтч/т [6].

Далее глинозем восстанавливают методом электролиза в расплавленном криолите, где в качестве анода используют угольные блоки, в результате чего выделяются большие объемы CO_2 [1]. При оценке эмиссии CO_2 также следует учитывать, потребляется ли в процессе электроэнергия от угольных электростанций [7, 8]. Потребление электроэнергии на данной стадии зависит от многих факторов и в среднем по миру составляет 14000–15500 кВтч/т [9]. При этом средний коэффициент выбросов в пересчете

на эмиссию CO₂ составляет 9,9 т CO₂-экв на тонну алюминия для Италии и 16,5–21,7 т CO₂-экв на тонну алюминия для Китая [6].

Доля извлечения алюминия в процессах производства глинозема и электролитического алюминия в мире составляют примерно 81,76 и 96,75 %, а значит только на этих двух стадиях производства теряется около 20 % [2].

Изделия из извлеченного алюминия изготавливают путем литья, прокатки или экструзии. Эта стадия производства также весьма энергоемка. Например, в Индии потребление электроэнергии при прокатке составляет 1650–1800 кВтч/т, а в мировой практике наиболее эффективные технологии требуют около 775 кВтч/т [9].

Производство алюминия материалоемко, влияет на окружающую среду и тесно связано с производством электроэнергии [10], как в области исходного сырья [11, 12], так преимущественно и в области потребления электроэнергии. В [13] отмечается, что алюминиевая промышленность составляет более 3,5 % от общемирового потребления электроэнергии, а в Китае – до 4,43 % [14]. Доля затрат на электроэнергию в себестоимости алюминия достигает до 35 % [15].

Для снижения негативных факторов алюминиевого производства ведутся исследования по совершенствованию технологического процесса, нацеленные на повышение доли извлечения алюминия [16, 17] или снижения объемов отходов [18–20], и подходов к управлению производством, нацеленных, как правило, на снижение энергозатрат [21–24]. Предприятиям алюминиевой промышленности России и стран Центральной Азии также необходимо повышать свою техническую оснащенность и внедрять передовые технологии управления [25].

В данном исследовании в качестве объекта рассматриваются технологические комплексы предприятий алюминиевой промышленности (производство глинозема в Павлодарской области Республики Казахстан), а предметом исследования выступает система управления, решающая задачу оптимального управления энергопотреблением. Целью исследования является разработка моделей, способных адекватно описывать объект исследования и формировать для него оптимальное управление в рамках поставленной задачи.

Материалы и методы

В системах управления технологических процессов производства алюминия использование подходов линейной теории автоматического управления обладает низкой эффективностью, поскольку слабо учитывает взаимное влияние технологических контуров и зачастую требует ручной настройки. Например, в [26, 27] рассматривается задача

автоматической стабилизации уровня красного шлама в баках моечного поезда, и показано, что система линейного управления значительно уступает в точности системе с оптимальным управлением на базе уравнения Эйлера–Лагранжа.

Создание сложных систем управления требует построения математических моделей. Для моделирования технологических процессов производства алюминия разработано множество подходов, значительная часть которых опирается на феноменологическое описание протекающих физических процессов.

Например, в [28] для технологического процесса кристаллизации гидрата алюмината натрия предложена модель трехфазной системы (жидкость и две твердые фазы) для реакторов с вытяжной трубой перемешивания, основанная на трехмерной эйлеровой модели нескольких жидкостей совместно с моделью турбулентности ренормализационной группы.

В [29, 30] предложена модель осаждения гиббсита, где кинетика осаждения в каждом резервуаре непрерывного осаждения моделируется с использованием динамического уравнения баланса количества осадков, включающего кристаллообразование, рост кристаллов и кинетику агломерации. Похожий подход использован в [31], где предложена математическая модель, описывающая динамику периодического ослабления затравочного осаждения раствора алюмината натрия при производстве оксида алюминия, использующая метод популяционного баланса для определения распределения частиц по размерам осадков гидроксида алюминия. Метод популяционного баланса используется также в [32] для модели процесса измельчения и классификации диаспоровых бокситов.

В [33] для выщелачивания оксида алюминия в процессе разложения глинозема предложена модель, построенная на основе механистического анализа процесса двухпоточного расщепления и кинетики расщепления диаспоры. Неизвестные параметры модели оцениваются с использованием алгоритма перехода состояний и в дополнение используется модель компенсации ошибок, построенная на основе машины экстремального обучения ядра, а также модель прогнозирования скорости выщелачивания глинозема. Альтернативный метод для определения неизвестных параметров моделей предложен в [34], где используются робастные процедуры согласования данных, основанные на М-оценках, которые являются обобщением оценки максимального правдоподобия.

Для моделирования промышленного испарителя с падающей пленкой при производстве глинозема в [35] предложена математическая модель, объединяющая модель с сосредоточенными пара-

метрами, определяющую концентрации веществ на выходе испарителя, и модель с распределенными параметрами, определяющую время выпаривания, толщину пленки, жидкостную нагрузку сырья и величину теплопередачи в зависимости от продольного расположения вниз по трубке относительно входа.

Модель энергопотребления при выпаривании предложена в [36], где использован метод иерархического согласования данных, учитывающий распределение технологических процессов во времени и пространстве. Для получения фактических данных о протекании технологического процесса используется стратегия сверки на множественных интервалах временной задержки, основанная на балансе материальных потоков и балансе тепловой энергии. А в [37] предложено использовать метод динамического согласования данных, который построен на нейронной сети Элмана, где в качестве целевой функции использована оценка коррентропии.

В [38] приведена модель энергопотребления электротехнических комплексов производства глинозема с непрерывным инерционным нелинейным замкнутым производством, построенная на основе балансовых уравнений и методов искусственного интеллекта.

Описанные модели чаще всего используются для планирования и оценки протекания технологических процессов, и ввиду их высокой сложности в целях оптимизации они применяются нечасто. Напрямую оптимизация с использованием математической модели технологического процесса применялась лишь в работах [26, 27, 39, 40]. В [39] для процесса выпаривания глинозема предложена математическая модель с кратными временными задержками. В качестве целевой функции задано определенное качество раствора алюмината натрия при наименьшем потреблении энергии и с фиксированными ограничениями состояния системы, а для реализации оптимального управления разработан численный алгоритм. А в [40] рассматривается технологический процесс смешивания глинозема, описываемый ввиду вариативности параметров сырья математической моделью с неопределенностями. Предложена двухуровневая система, где на первом уровне осуществляется оптимальная оценка модели смешивания, а на втором решается задача стохастической оптимизации, где неопределенности описываются как конечные ограничения.

Для преодоления сложности и неопределенности феноменологических моделей технологического процесса в задачах оптимизации технологических процессов алюминиевой промышленности высокую эффективность показали интеллектуальные и адаптивные системы.

Так, для процесса приготовления сырой суспензии в [41] предложена двухэтапная интеллектуальная система оптимизации. На первом этапе строится динамическая модель технологического процесса с нейронными сетями для прогнозирования качества сырьевого шлама и предлагается многокритериальная иерархическая экспертная стратегия для определения оптимальной заданной точки дозирования. На втором этапе строится оптимальная модель планирования с неопределенностью, обеспечивающая оптимальную комбинацию выбранных емкостей.

Схожий подход использован в [42], где для оптимального управления процессом смешивания применяется механистическая прогнозирующая модель с интеллектуальным компенсатором на основе нейронных сетей. Оптимальное задание для дозирования сырья определяется путем иерархического вывода по отклонению между результатами прогнозирования и целевыми показателями качества.

Нелинейное прогнозирующее управление предложено также в [43]. В качестве объекта рассмотрен промышленный четырехступенчатый испаритель. Для ликвидации статической ошибки использован метод адаптации параметров.

В [44] для процесса многоступенчатого выпаривания предложена адаптивная система оптимального управления на базе глубокого обучения с подкреплением. На первом этапе задача оптимального управления сформулирована как марковский процесс принятия решений с ограничениями. Далее, принимая совокупную ошибку отслеживания плотности жидкости на выходе в качестве ограничения, на базе уравнения Лагранжа разработан алгоритм оптимизации, где корректирующее воздействие формируется на базе случайных векторных сетей функциональных связей.

Для нелинейных каскадных технологических процессов, таких как обогащение гематита, в [45] предложено интеллектуальное управление с переключением, которое включает в себя блок предварительной настройки внутреннего контура с помощью статической модели системы, компенсатор заданного значения на основе нечетких рассуждений, средство поддержания заданного значения и механизм переключения, использующий рассуждения на основе правил.

Еще одним вариантом решения задачи управления для производства алюминия является усовершенствованное управление технологическими процессами, основанное на алгоритмах многомерного прогнозирующего управления [46]. А в [47] предложено использовать прогнозирующее управление на основе рекуррентной нейронной сети с применением для обучения алгоритма Левенберга–

Марквардта с автоматическим дифференцированием параллельно с контурами ПИ-регулирования. Для испарителя с принудительной циркуляцией в [48] предложено интеллектуальное развязывающее ПИД-регулирование, для которого используется развязывающий компенсатор и нейронный сетевой компенсатор с прямой связью, а параметры определяются обобщенным законом прогнозирующего управления.

В [49–51] предложено использовать нелинейные адаптивные модели для непрерывных производств в алюминиевой промышленности, методы искусственного интеллекта и ситуационное управление при поиске оптимальных значений его технологических параметров на основе реальных цен на энергоресурсы и сырье.

В данном исследовании в качестве объекта рассматриваются технологические комплексы предприятий алюминиевой промышленности на примере гидрохимического производства глинозема мощностью 200 МВт в Павлодарской области Республики Казахстан. Для данных производств характерны: нелинейность, многосвязность, превышение объемов циркулирующих материальных потоков над объемами прямых материальных потоков, отсутствие для отдельных технологических переделов пропорциональной зависимости между входом и выходом, неопределенность параметров, связанная с различающимся химическим составом сырья.

Предметом исследования выступает система управления, решающая задачу оптимального управления энергопотреблением. Важным аспектом является необходимость решения данной задачи в условиях перехода объекта управления на различные концентрационные режимы работы.

С учетом проведенного анализа, в качестве основного подхода к построению математической модели предлагается разделение технологического процесса на отдельные переделы и составление для них модели баланса материальных потоков. Для определения неизвестных параметров модели используется теория нечетких множеств [52, 53] на основании экспертных оценок.

Для компенсации ошибок модели предлагается вводить идентификационные параметры, отыскиваемые методом градиентного спуска. Идентификационным критерием выступает квадратичное рассогласование значения параметров, полученных экспериментально и с помощью моделирования, отнесенное к дисперсии месячных значений величин.

Для применения модели в условиях изменения технологических режимов модель баланса материальных потоков предлагается дополнить дифференциальными уравнениями, учитывающими изме-

нения параметров во времени, вызванные наиболее значимыми инерционными элементами технологического процесса и обобщенными буферными емкостями, имеющими наиболее высокую удерживающую способность.

Полученную модель предлагается использовать для оптимизации энергопотребления. В качестве критериев оптимизации предлагается одновременная минимизация электропотребления и расхода пара при ограничениях на цены, объемы сырья и энергии и без увеличения себестоимости готовой продукции и производительности. Для поиска оптимального решения предлагается использовать метод генетического алгоритма [53].

Теоретическая база

Модель баланса материальных потоков

Электропотребление в рассматриваемых технологических комплексах предприятий алюминиевой промышленности расходуется в основном на перемещение и физико-химическое преобразование потоков вещества, проходящих по технологическим участкам, вследствие чего объем электропотребления определяется объемами перерабатываемых потоков, а сами объемы определяются концентрационными технологическими режимами. Для описания баланса материальных потоков составлена структурная схема гидрохимического производства по методу Байера, показанная на рис. 1, содержащая семь блоков, описывающих технологические переделы, взаимосвязанные через материальные потоки, а также четыре контура управления, с помощью которых поддерживается концентрационный технологический режим.

Технологические процессы в переделах I–VII описываются нелинейными алгебраическими уравнениями, где номера материальных потоков обозначены индексом i , а номера переделов – индексом j :

$$\begin{aligned} \sum_i L_{ij} A_i G_i F &= 0; & \sum_i H_{ij} F_i G_i &= 0; & \sum_i K_{ij} B_i G_i F &= 0; \\ \sum_i I_{ij} F_i &= 0; & \sum_i I_{ij} F_i D_i &= 0; & M_i &= 1,645 \frac{B_i}{A_i}, \end{aligned} \quad (1)$$

где F_i – объемный расход раствора; D_i – плотность раствора; H_{ij} – весовое соотношение жидкого к твердому; M_i – каустический модуль раствора; A_i и B_i – концентрация жидкой фазы Al_2O_3 и Na_2O_k соответственно; G_i – концентрация твердой фазы Al_2O_3 ; I_{ij} , K_{ij} , L_{ij} , H_{ij} – нелинейные функции i -го потока, имеющие положительное значение, если поток входящий, отрицательное, если исходящий, и равные нулю, если данный поток не проходит через j -й передел.

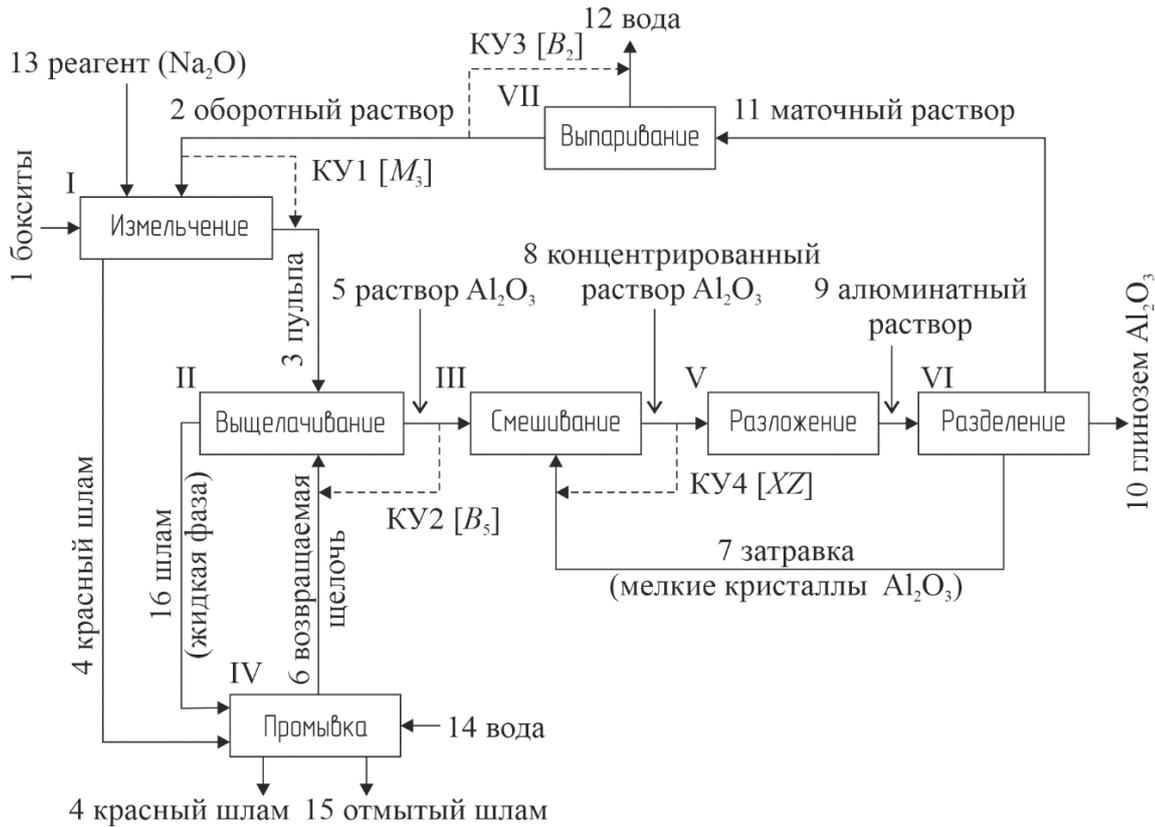


Рис. 1. Структурная схема модели баланса материальных потоков
 Fig. 1. Block-diagram of the mass balance model

Дополнительно технологические процессы в переледе V описываются нелинейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{dA_9}{dl} = -R_d K_d \frac{A_9 - A_E}{A_E^2} (0,96 + 0,29S_K) \times \left(3A_9 - A_E - 2 \left(\frac{G_8}{1,529 - 0,629G_8} + A_8 \right) \right), \quad (2)$$

где R_d – идентификационный коэффициент; S_K – площадь катализатора; A_E – равновесная концентрация Al_2O_3 ; l – длительность декомпозиции; K_d – скорость разложения, зависящая от концентрации щелочи B_8 , температуры T_D и площади поверхности катализатора S_K , при этом получить однозначную аналитическую зависимость для K_d не представляется возможным.

В качестве метода решения систем нелинейных уравнений (1) выбран метод простой итерации, а для численного метода решения дифференциального уравнения (2) выбран метод Эйлера, при этом доказана теорема о разрешимости задачи Коши и определена величина глобальной погрешности, которая в промежутке интегрирования в 100 часов при шаге интегрирования $h=0,05$ часа не превышала 3 %.

По числу контуров управления КУ1–КУ4 в полученной модели (1) и (2) в качестве входных параметров выступает вектор $\mathbf{X}=[B_2, M_3, B_5, XZ]$, где XZ – заправочное отношение, определяемое как отношение объема материального потока катализатора F_7 к прямому потоку F_5 . Контролируемыми внешними воздействиями выступают параметры сырья и температура процессов. Выходными параметрами являются энергопотребление и вектор технологических параметров производства $\mathbf{Y}=[M_2, B_3, A_4, B_4, M_5, B_6, M_6, G_8, G_9, B_{11}, B_{15}, M_{15}]$. Энергопотребление включает в себя электропотребление, вычисляемое как:

$$W = K_3 \sum_i W_{i3} F_i, \quad (3)$$

где K_3 – поправочный коэффициент; W_{i3} – затраты электроэнергии на i -ый материальный поток, определяющиеся мощностями приводов, насосов, мешалок и т. п., а также расход пара:

$$Q_{п} = K_{вып} F_{12}, \quad (4)$$

где $K_{вып}$ – коэффициент расхода пара на 1 м³ упаренной воды.

По сравнению со схемой на рис. 1 технологический передел V раскрыт в виде последовательности блоков, имитирующих работу аппаратов-декомпозиеров, а также добавлен технологический передел VIII, имитирующий буферную емкость оборотного раствора, которая имеет наибольшую удерживающую способность, в связи с чем она выбрана в качестве обобщенной буферной емкости.

Модель каждого n -ого аппарата-декомпозиера технологического передела V описана системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} F_{n-1} &= F_n + 0,53 V_{Dn} V_n \left(1 - \frac{G_n}{2,43}\right); \\ V_{Dn} \frac{d}{dt} G_n &= F_{n-1} G_{n-1} - F_n G_n + 1,53 V_{Dn} V_n \left(1 - \frac{G_n}{2,43}\right); \\ V_{Dn} \frac{d}{dt} A_n \left(1 - \frac{G_n}{2,43}\right) &= \\ &= F_{n-1} A_{n-1} \left(1 - \frac{G_{n-1}}{2,43}\right) - (F_n A_n + V_{Dn} V_n) \left(1 - \frac{G_n}{2,43}\right); \\ V_{Dn} \frac{d}{dt} B_n \left(1 - \frac{G_{n-1}}{2,43}\right) &= \\ &= F_{n-1} B_{n-1} \left(1 - \frac{G_{n-1}}{2,43}\right) - F_n B_n \left(1 - \frac{G_n}{2,43}\right); \\ V_n &= -R_{dn} K_{dn} \frac{(A_n - A_{En})^2}{A_{En}^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где F_n – расход гидратной пульпы на выходе n -ого аппарата; A_n и B_n – концентрации жидкой фазы Al_2O_3 и Na_2O_k соответственно; G_n – концентрации твердой фазы Al_2O_3 ; V_{Dn} – объем каждого n -ого аппарата; V_n – скорость разложения раствора в аппарате; $A_{En} = f(B_{n-1}, T_{Dn})$ – равновесная концентрация Al_2O_3 ; $K_{dn} = f(B_{n-1}, T_{Dn}, S_{Kn})$ – коэффициент, определяющий скорость разложения при текущей концентрации щелочи B_n , температуре T_{Dn} и площади поверхности катализатора S_{Kn} каждого n -ого аппарата. Величина K_{dn} рассчитывается согласно (5). Значение идентификационного коэффициента R_{dn} каждого n -ого аппарата определяется методом градиентного спуска по аналогии с приведенным выше описанием.

Буферная емкость оборотного раствора VIII описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dV_D}{dt} = F_{11} - F_2, \quad (8)$$

где V_D – объем раствора в обобщенной емкости.

Уравнение (8) используется совместно с системой уравнений (1), а система уравнений (7) замещает (2). Энергопотребление вычисляется по (3) и (4). Векторы входных и выходных параметров те же, что и в исходной модели баланса материальных потоков.

Оптимальное управление энергопотреблением

Контуры управления КУ1–КУ4 рассматриваемого технологического комплекса предприятий алюминиевой промышленности воздействуют на концентрационный технологический режим и опосредованно через него влияют на энергопотребление. Следовательно, поиск энергоэффективного режима работы должен выполняться по всем параметрам, входящим в вектор $\mathbf{X}=[B_2, M_3, B_5, XZ]$.

Для обеспечения наилучшего с точки зрения энергопотребления технологического режима поставлена оптимизационная задача. В качестве критериев оптимизации выбраны следующие: 1) минимизация электропотребления; 2) минимизация расхода пара; 3) ограничения на цены, объемы сырья и энергии и без увеличения себестоимости готовой продукции и производительности.

Для сведения многокритериальной оптимизационной задачи к однокритериальной выбранные критерии объединены в обобщенном критерии, в качестве которого использована себестоимость 1 т готовой продукции, в которой учитывается и потребление электроэнергии, и расход пара и сырья:

$$S = C[K_1 W(\mathbf{X}), K_2 Q_n(\mathbf{X}), K_3 F_1(\mathbf{X}), K_4 F_{13}(\mathbf{X})]^T \frac{1}{F_{10}} \rightarrow \min, \quad (9)$$

где \mathbf{C} – вектор цен, включающий цену на электроэнергию, пар и сырье соответственно, K_1 – K_4 – коэффициенты, определяющие долю неучтенных затрат.

В качестве метода решения оптимизационной задачи использован метод генетического алгоритма. Кодирование элементов популяции выполнялось в двоичном коде для всей области допустимых значений по четырем управляемым параметрам B_2 , M_3 , B_5 и XZ , а создание четырех начальных популяций хромосом – с помощью случайного выбора из всей области решений рассматриваемой задачи.

Мерой качества каждой хромосомы ch_i в пространстве поиска задана функция приспособленности $G(ch_i)$, основанная на критерии (9) при условии обеспечения существенной разницы в значениях для каждой особи популяции:

$$G(ch_i) = MAX(S) - S(ch_i) \rightarrow \max,$$

где $MAX(S)$ – максимально возможная себестоимость готовой продукции при решении данной задачи.

Результаты исследования

С использованием описанной модели баланса материальных потоков для рассматриваемого технологического комплекса предприятий алюминиевой промышленности получены статические характеристики электропотребления W в расчете на 1 т готовой продукции, показанные на рис. 3.

На базе модели изменения технологических режимов получены переходные процессы, возникающие при изменении вектора X . Для иллюстрации на рис. 4 показаны переходные процессы W и V_D при ступенчатом изменении входных параметров относительно их среднего допустимого значения.

Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что реакция изменения энергопотребления W на изменение входных параметров M_3 и B_5 в целом соответствует статической характеристике, показанной на рис. 3.

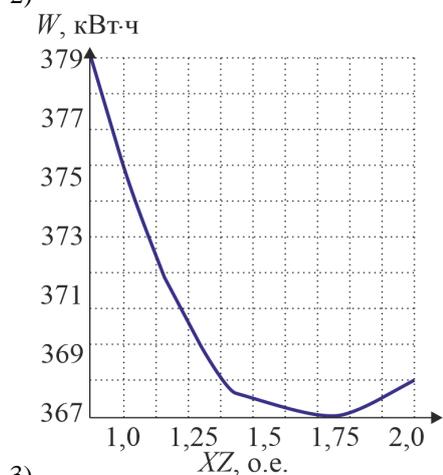
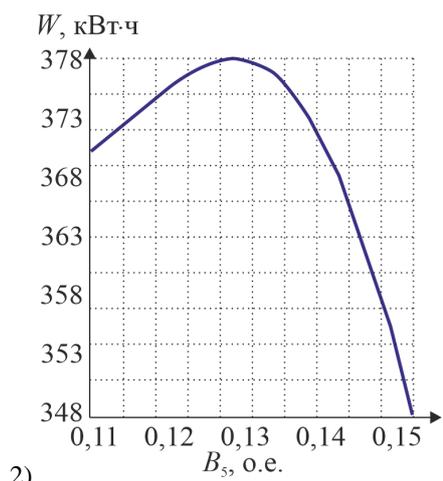
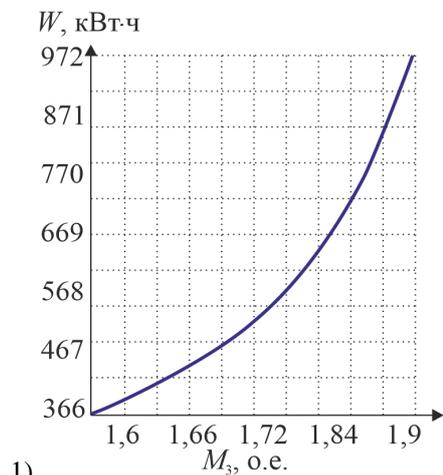


Рис. 3. Электропотребление W на 1 т готовой продукции в зависимости от: 1) M_3 ; 2) B_5 ; 3) XZ
Fig. 3. Electrical consumption W per 1 ton of product depending on: 1) M_3 ; 2) B_5 ; 3) XZ

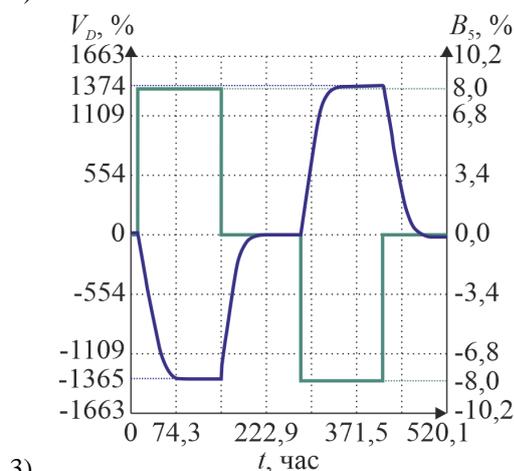
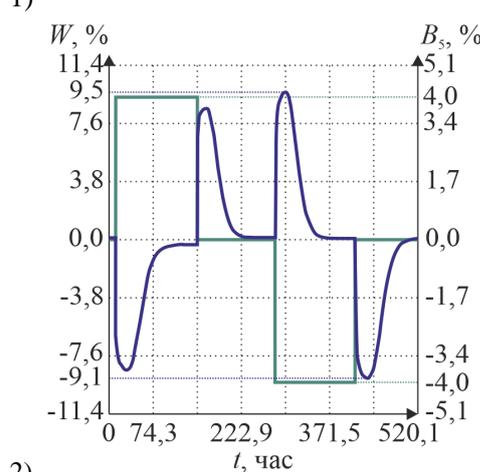
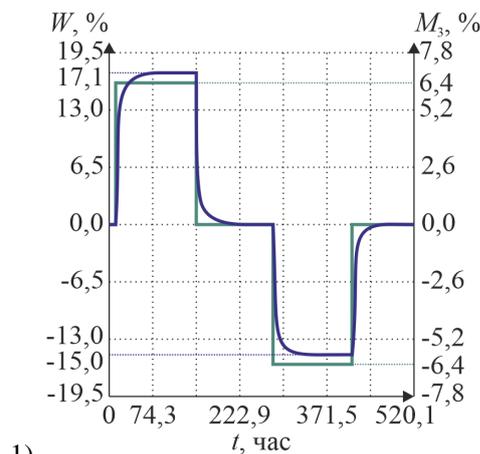


Рис. 4. Переходные процессы: 1) W при изменении M_3 ; 2) W при изменении B_5 ; 3) V_D при изменении B_5
Fig. 4. Transients: 1) W when M_3 changes; 2) W when B_5 changes; 3) V_D when B_5 changes

Например, снижение M_3 на 6,4 % приводит к снижению W на величину до 15 %, а увеличение B_5 на 4 % приводит к кратковременному снижению W на величину до 9 % длительностью до 3 суток. Однако достигнутая таким образом экономия энергопотребления может спровоцировать аварийную ситуацию. Так, при таком же увеличении M_3 как на рис. 4-1 изменение V_D достигает 202,8 %, а при снижении B_5 на 8 % увеличение V_D достигает 1374 % (рис. 4-3), что свидетельствует о возникновении аварийного перелива.

Следует уточнить, что в реальном производстве вектор входных параметров не может быть изменен ступенчато, однако даже при плавном изменении X возможна несоразмерно высокая реакция со стороны технологического процесса, приводящая к аварийной ситуации. Поэтому управление вручную для технологического комплекса предприятий алюминиевой промышленности следует свести к минимуму, а для автоматического управления целесообразно применять предложенный алгоритм оптимизации.

Анализ результатов решения оптимизационной задачи показал, что по сравнению с режимом, когда входные параметры поддерживаются на уровне их среднего допустимого значения, при технологических параметрах, полученных в ходе оптимизации, затраты электроэнергии снизились на 7 %, а пара – на 11 %.

Обсуждение и заключение

В результате исследования разработаны модель баланса материальных потоков и модель изменения технологических режимов, определяющие энергопотребление технологических комплексов предприятия алюминиевой промышленности с непрерывным инерционным нелинейным замкнутым производством.

На базе полученных моделей определены динамические характеристики энергопотребления, а также параметры протекания технологических процессов в зависимости от входных параметров. При ручном изменении входных параметров полученная модель позволяет прогнозировать несоразмерно высокую реакцию со стороны технологического процесса, свидетельствующую о возникновении аварийной ситуации. Следовательно, рекомендуется все управляющие воздействия на режимы производства ввиду их слабой предсказуемости первоначально проверять с помощью предложенных моделей.

Также в результате исследования решена оптимизационная задача управления энергопотреблением непрерывного производства с учетом технологических параметров и стоимостных факторов, обеспечивающая снижение затрат электроэнергии на 7 % и пара на 11 %. При доле электроэнергии в себестоимости продукции порядка 30 % достигнутая оптимизация энергопотребления снизит себестоимость продукции на величину около 2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sverdrup H.U., Ragnarsdottir K.V., Koca D. Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and longterm development of the global reserves // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2015. – Vol. 103. – P. 139–154. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.06.008.
2. Aluminum material flow analysis for production, consumption, and trade in China from 2008 to 2017 / Qiangfeng Li, Tao Dai, Tianming Gao, Weiqiong Zhong, Bojie Wen, Tianjiao Li, Yanjing Zhou // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 296. – P. 126444. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126444.
3. Farjana Sh.H., Mahmud M.A.P., Huda N. Life cycle assessment in mining industries // *Life Cycle Assessment for Sustainable Mining*. – Elsevier, 2020. – P. 15–59. DOI: 10.1016/B978-0-323-85451-1.00002-0.
4. Chen J. (N), Peng D. Management and disposal of alumina production wastes // *Managing Mining and Minerals Processing Wastes: Concepts, Design, and Applications*. – Elsevier, 2023. – P. 133–163. DOI: 10.1016/B978-0-323-91283-9.00007-9.
5. Circular economy and life cycle assessment of alumina production: simulation-based comparison of Pedersen and Bayer processes / Y. Ma, A. Preveniou, A. Kladis, J.B. Pettersen // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 366. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132807.
6. Springer C. Assessing energy intensity and retrofit opportunities for the aluminum industry: lessons from Vietnam // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2018. – Vol. 131. – P. 235–246. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.020.
7. Life-cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of aluminium production in China / Tianduo Peng, Xunmin Ou, Xiaoyu Yan, Gehua Wang // *Energy Procedia*. – 2019. – Vol. 158. – P. 3937–3943. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.849.
8. Scenario analysis on carbon peaking pathways for China's aluminum casting industry / Liu Weipeng, Chunhui Zhao, Yusuke Kishita, Anping Wan, Tao Peng, Yasushi Umeda // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 422. – P. 138571. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138571.
9. Dutta M., Mukherjee S. An outlook into energy consumption in large scale industries in India: the cases of steel, aluminium and cement // *Energy Policy*. – 2010. – Vol. 38. – Iss. 11. – P. 7286–7298. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.07.056.
10. Farjana Sh.H., Huda N., Mahmud M.A.P. Impacts of aluminum production: a cradle to gate investigation using life-cycle assessment // *Science of The Total Environment*. – 2019. – Vol. 663. – P. 958–970. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.400.
11. A review of the alumina production from coal fly ash, with a focus in Russia / D. Valeev, P. Bobylev, N. Osokin, I. Zolotova, I. Rodionov, C. Salazar-Concha, K. Verichev // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 363. – P. 132360. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132360.
12. Improving the A/S ratio of pretreated coal fly ash by a two-stage roasting for Bayer alumina production / Da Li, Kaixi Jiang, Xunxiong Jiang, Feng Zhao, Shengdong Wang, Linyong Feng, Denggao Zhang // *Fuel*. – 2022. – Vol. 310. – Part C. – P. 122478. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122478.

13. Luthin A., Backes J.G., Traverso M. A framework to identify environmental-economic trade-offs by combining life cycle assessment and life cycle costing – a case study of aluminium production // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 321. – P. 128902. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128902.
14. Resources saving and emissions reduction of the aluminum industry in China / Qiang Yue, Heming Wang, Chengkang Gao, Tao Du, Liying Liu, Zhongwu Lu // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2015. – Vol. 104. – P. 68–75. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.09.006.
15. Хиревич Э.Ю., Руйга И.П. Особенности инновационного развития алюминиевой отрасли Российской Федерации // *Концепт*. – 2015. – № 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-innovatsionnogo-razvitiya-alyuminievoy-otrasli-rossiyskoj-federatsii> (дата обращения: 19.11.2023).
16. Multi-material circulation optimization of the calcification-carbonation process based on material balance and phase transformation for cleaner production of alumina / Yanxiu Wang, Ting Zhang, Guozhi Lyu, Linan Ma, Weiguang Zhang // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 290. – P. 125828. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125828.
17. Overview of process control of novel calcification-carbonation process for bauxite residue treatment / Yanxiu Wang, Ting Zhang, Guozhi Lv, Yan Liu, Weiguang Zhang, Qiuyue Zhao // *Hydrometallurgy*. – 2021. – Vol. 199. – P. 105536. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105536.
18. Peibei Zhang, Xueyuan Zhu, Qiang Jin. Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of a promising alumina extraction process from secondary aluminum dross in China // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – Iss. 3. – P. 109658. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109658.
19. Physical simulation of recovering cast iron from bayer red mud / Shihong Liu, Aoping He, Ni Wu, and Jianmin Zeng // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 37. – P. 443–449. – DOI: 10.1016/j.promfg.2019.12.072.
20. Toward sustainable green alumina production: a critical review on process discharge reduction from Gibbsite bauxite and large-scale applications of red mud / Zhou Guo, Yi Wang, Tian Qi, Qiu Zhou, Gui Liu, Zhi Peng, Xiao Li // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – № 2. – P. 109433. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109433.
21. An assessment of environmental impacts and economic benefits of multiple aluminum production methods / Sulong Zhu, Chengkang Gao, Kaihui Song, Mingming Chen, Fan Wu, Xiaojun Li // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 370. – P. 133523. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133523.
22. Energy consumption and GHG emission for regional aluminum industry: a case study of Henan Province, China / Sainan Liu, Shanshan Wang, Ke Wang, Hui Yue, Lei Liu, Shuxian Yang, Pengju Zhang, Ruiqin Zhang // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 105. – P. 3391–3396. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.777.
23. Resilience optimization of multi-modal energy supply systems: case study in German metal industry / L. Hoettecke, S. Thiem, J. Schäfer, S. Niessen // *Computers & Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 162. – P. 107824. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107824.
24. Techno-economic and environmental characterization of industrial technologies for transparent bottom-up energy modeling / D. Lerede, C. Bustreo, F. Gracceva, M. Saccone, L. Savoldi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 140. – P. 110742. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110742.
25. Корнеев С.И. Алюминиевая промышленность Китая и перспективы мировой алюминиевой индустрии // *Цветные металлы*. – 2021. – № 4. – С. 5–11. DOI: 10.17580/tsm.2021.04.01.
26. Sidrak Y.L. Control of counter-current washing operation in alumina production; classical and optimal solutions // *Control Engineering Practice*. – 1996. – Vol. 4. – Iss. 1. – P. 73–79. DOI: 10.1016/0967-0661(95)00208-5.
27. Sidrak Y.L. Control of the thickener operation in alumina production // *Control Engineering Practice*. – 1997. – Vol. 5. – Iss. 10. – P. 1417–1426. DOI: 10.1016/S0967-0661(97)00138-X.
28. Suspension quality and power consumption of the complex multiphase flow field in a draft-tube stirred reactor / Licheng Wang, Yanxing Tian, Yu Qi, Yiwei Gao, Mengya Wang // *Particuology*. – 2021. – Vol. 56. – P. 91–102. DOI: 10.1016/j.partic.2020.10.008.
29. Bekker A.V., Li T.S., Livk I. Dynamic response of a plant-scale gibbsite precipitation circuit // *Hydrometallurgy*. – 2017. – Vol. 170. – P. 24–33. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.06.002.
30. Bekker A.V., Li T.S., Livk I. Understanding oscillatory behaviour of gibbsite precipitation circuits // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2015. – Vol. 101. – P. 113–124. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.07.006.
31. Mingchun Li, Yusheng Wu Dynamic simulation of periodic attenuation in seeded precipitation of sodium aluminate solution // *Hydrometallurgy*. – 2012. – Vol. 113–114. – P. 91–97. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.12.004.
32. Hybrid modeling of an industrial grinding-classification process / Xiaoli Wang, Yalin Wang, Chunhua Yang, Degang Xu, Weihua Gui // *Powder Technology*. – 2015. – Vol. 279. – P. 75–85. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.03.031.
33. A new prediction model based on the leaching rate kinetics in the alumina digestion process / Yongfang Xie, Simi Wei, Xiaoli Wang, Sen Xie, Chunhua Yang // *Hydrometallurgy*. – 2016. – Vol. 164. – P. 7–14. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.05.005.
34. Llanos C.E., Sánchez M.C. An efficient methodology to select high-performance M-estimators for robust data reconciliation // *Computers & Chemical Engineering*. – 2023. – Vol. 176. – P. 108297. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2023.108297.
35. Modeling and simulation of an industrial falling film evaporator for alumina production / Xiaoli Wang, Pan Xiong, Kaixuan Sun, Yongfang Xie, Chunhua Yang // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2020. – Vol. 154. – P. 303–315. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.10.038.
36. A hierarchical data reconciliation based on multiple time-delay interval estimation for industrial processes / Xie Sen, Wang Huaizhi, Peng Jianchun, Liu Xiaoli, Yuan Xiaofeng // *ISA Transactions*. – 2020. – Vol. 105. – P. 198–209. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.06.001.
37. Guiting Hu, Luping Xu, Zhengjiang Zhang Correntropy based Elman neural network for dynamic data reconciliation with gross errors // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. – 2022. – Vol. 140. – P. 104568. DOI: 10.1016/j.jtice.2022.104568.

38. Зайцева Н.М., Манусов В.З. Создание интеллектуальной среды управления мощным узлом нагрузки на примере Павлодарской области // Вестник Инновационного Евразийского университета. – 2023. – № 2 (90). – С. 122–131. DOI: 10.37788/2023-2/122-131.
39. Optimal control of an industrial-scale evaporation process: sodium aluminate solution / Q.Q. Chai, C.H. Yang, K.L. Teo, W.H. Gui // Control Engineering Practice. – 2012. – Vol. 20. – № 6. – P. 618–628. DOI: 10.1016/j.conengprac.2012.03.001.
40. Stochastic optimization for real-time operation of alumina blending process / Lingshuang Kong, Yanyan Yin, Chunhua Yang, Weihua Gui, K.L. Teo // Journal of Process Control. – 2020. – Vol. 96. – P. 49–56. DOI: 10.1016/j.jprocont.2020.10.005.
41. A two-stage intelligent optimization system for the raw slurry preparing process of alumina sintering production / Chunhua Yang, Weihua Gui, Lingshuang Kong, Yalin Wang // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2009. – Vol. 22. – Iss. 4–5. – P. 786–795. DOI: 10.1016/j.engappai.2008.11.003.
42. Modeling and optimal-setting control of blending process in a metallurgical industry / Chunhua Yang, Weihua Gui, Lingshuang Kong, Yalin Wang // Computers & Chemical Engineering. – 2009. – Vol. 33. – № 7. – P. 1289–1297. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.01.005.
43. Rangaiah G.P., Saha P., Tade M.O. Nonlinear model predictive control of an industrial four-stage evaporator system via simulation // Chemical Engineering Journal. – 2002. – Vol. 87. – № 3. – P. 285–299. DOI: 10.1016/S1385-8947(01)00240-6.
44. Data-driven constrained reinforcement learning for optimal control of a multistage evaporation process / Yao Yao, Jinliang Ding, Chunhui Zhao, Yonggang Wang, Tianyou Chai // Control Engineering Practice. – 2022. – Vol. 129. – P. 105345. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105345
45. Tianyou Chai, Haibo Li, Hong Wang. An intelligent switching control for the intervals of concentration and flow-rate of underflow slurry in a mixed separation thickener // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Vol. 47. – Iss. 3. – P. 338–345. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02114.
46. Захаркин М.А., Кнеллер Д.В. Применение методов и средств усовершенствованного управления технологическими процессами (АРС) // Датчики и системы. – 2010. – № 10. – С. 57–71.
47. Identification and predictive control of a multistage evaporator / J.C. Atuonwu, Y. Cao, G.P. Rangaiah, M.O. Tade // Control Engineering Practice. – 2010. – Vol. 18. – Iss. 12. – P. 1418–1428. DOI: 10.1016/j.conengprac.2010.08.002.
48. Intelligent decoupling PID control for the forced-circulation evaporation system / Yonggang Wang, Xinfu Pang, Zailin Piao, Jingjing Fang, Jun Fu, Tianyou Chai // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2015. – Vol. 23. – № 12. – P. 2075–2086. DOI: 10.1016/j.cjche.2015.09.008.
49. Zaytseva N.M. Increase of energy efficiency of alumina production on the basis of process modeling // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. – Tomsk, 1–4 December 2015. – Tomsk: IEEE, 2015. – P. 1–4.
50. Zaytseva N.M. Solution of the problem of searching for an energy-efficient functioning mode of a continuous production using simulation and artificial intelligence methods // Proceedings of 2016 International Conference APEIE. – Novosibirsk, 3–6 October 2016. – Novosibirsk: IEEE, 2016. – Vol. 2. – P. 250–254.
51. Зайцева Н.М. Оперативное управление энергоёмким нелинейным инерционным производством // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 1–2. – С. 161–167.
52. Zadeh L. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – № 8. – P. 338–353.
53. Piegat A. Fuzzy Modelling and Control. – Heidelberg; New York: Physica Verlag, 2001. – 728 p.

Информация об авторах

Наталья Михайловна Зайцева, доктор технических наук, профессор, Торайгыров университета, Республика Казахстан, 140000, г. Павлодар, ул. Ломова, 64. zaitzevns@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3779-0555>

Семькина Ирина Юрьевна, доктор технических наук, доцент, директор учебно-научного центра информационных технологий обучения, Севастопольский государственный университет, Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. arinasemykina@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6874-1735>

Поступила в редакцию: 11.03.2024

Поступила после рецензирования: 03.04.2024

Принята к публикации: 21.10.2024

REFERENCES

1. Sverdrup H.U., Ragnarsdottir K.V., Koca D. Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the global reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, vol. 103, pp. 139–154. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.06.008.
2. Qiangfeng Li, Tao Dai, Tianming Gao, Weiqiong Zhong, Bojie Wen, Tianjiao Li, Yanjing Zhou. Aluminum material flow analysis for production, consumption, and trade in China from 2008 to 2017. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 296, pp. 126444. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126444.
3. Farjana Sh.H., Mahmud M.A.P., Huda N. Life cycle assessment in mining industries. *Life Cycle Assessment for Sustainable Mining*. Elsevier, 2020, pp. 15–59. DOI: 10.1016/B978-0-323-85451-1.00002-0.
4. Chen J. (N.), Peng D. Management and disposal of alumina production wastes. *Managing Mining and Minerals Processing Wastes: Concepts, Design, and Applications*. Elsevier, 2023, pp. 133–163. DOI: 10.1016/B978-0-323-91283-9.00007-9.
5. Ma Y., Prevenioui A., Kladis A., Pettersen J.B. Circular economy and life cycle assessment of alumina production: simulation-based comparison of Pedersen and Bayer processes. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 366. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132807.

6. Springer C. Assessing energy intensity and retrofit opportunities for the aluminum industry: lessons from Vietnam. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 131, pp. 235–246. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.020.
7. Tianduo Peng, Xunmin Ou, Xiaoyu Yan, Gehua Wang. Life-cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of aluminium production in China. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 3937–3943. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.849.
8. Liu Weipeng, Chunhui Zhao, Yusuke Kishita, Anping Wan, Tao Peng, Yasushi Umeda. Scenario analysis on carbon peaking pathways for China's aluminum casting industry. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 422, pp. 138571. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138571.
9. Dutta M., Mukherjee S. An outlook into energy consumption in large scale industries in India: the cases of steel, aluminium and cement. *Energy Policy*, 2010, vol. 38, Iss. 11, pp. 7286–7298. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.07.056.
10. Farjana Sh.H., Huda N., Parvez Mahmud M.A. Impacts of aluminum production: a cradle to gate investigation using life-cycle assessment. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 663, pp. 958–970. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.400.
11. Valeev D., Bobylev P., Osokin N., Zolotova I., Rodionov I., Salazar-Concha C., Verichev K. A review of the alumina production from coal fly ash, with a focus in Russia. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 363, pp. 132360. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132360.
12. Da Li, Kaixi Jiang, Xunxiong Jiang, Feng Zhao, Shengdong Wang, Linyong Feng, Denggao Zhang. Improving the A/S ratio of pretreated coal fly ash by a two-stage roasting for Bayer alumina production. *Fuel*, 2022, vol. 310, Part C, pp. 122478. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122478.
13. Luthin A., Backes J.G., Traverso M. A framework to identify environmental-economic trade-offs by combining life cycle assessment and life cycle costing – a case study of aluminium production. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 321, pp. 128902. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128902.
14. Qiang Yue, Heming Wang, Chengkang Gao, Tao Du, Liying Liu, Zhongwu Lu. Resources saving and emissions reduction of the aluminum industry in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, vol. 104, pp. 68–75. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.09.006.
15. Khirevich E.Yu., Ruiga I.R. Features of innovative development of the aluminum industry of the Russian Federation. *Concept*, 2015, no. 8. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-innovatsionnogo-razvitiya-alyuminievoy-otrasli-rossiyskoy-federatsii> (accessed 19 November 2023).
16. Yanxiu Wang, Ting Zhang, Guozhi Lyu, Linan Ma, Weiguang Zhang. Multi-material circulation optimization of the calcification-carbonation process based on material balance and phase transformation for cleaner production of alumina. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 290, pp. 125828. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125828.
17. Yanxiu Wang, Ting Zhang, Guozhi Lv, Yan Liu, Weiguang Zhang, Qiuyue Zhao. Overview of process control of novel calcification-carbonation process for bauxite residue treatment. *Hydrometallurgy*, 2021, vol. 199, pp. 105536. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105536.
18. Peibei Zhang, Xueyuan Zhu, Qiang Jin. Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of a promising alumina extraction process from secondary aluminum dross in China. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, vol. 11, Iss. 3, pp. 109658. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109658.
19. Shihong Liu, Aoping He, Ni Wu, Jianmin Zeng. Physical simulation of recovering cast iron from bayer red mud. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 37, pp. 443–449. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.12.072.
20. Zhou Guo, Yi Wang, Tian Qi, Qiu Zhou, Gui Liu, Zhi Peng, Xiao Li. Toward sustainable green alumina production: a critical review on process discharge reduction from Gibbsite bauxite and large-scale applications of red mud. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 109433. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109433.
21. Sulong Zhu, Chengkang Gao, Kaihui Song, Mingming Chen, Fan Wu, Xiaojun Li. An assessment of environmental impacts and economic benefits of multiple aluminum production methods. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 370, pp. 133523. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133523.
22. Sainan Liu, Shanshan Wang, Ke Wang, Hui Yue, Lei Liu, Shuxian Yang, Pengju Zhang, Ruiqin Zhang. Energy consumption and GHG emission for regional aluminum industry: a case study of Henan Province, China. *Energy Procedia*, 2017, vol. 105, pp. 3391–3396. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.777.
23. Hoettecke L., Thiem S., Schäfer J., Niessen S. Resilience optimization of multi-modal energy supply systems: case study in German metal industry. *Computers & Chemical Engineering*, 2022, vol. 162, pp. 107824. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107824.
24. Lerede D., Bustreo C., Gracceva F., Saccone M., Savoldi L. Techno-economic and environmental characterization of industrial technologies for transparent bottom-up energy modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 140, pp. 110742. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110742.
25. Korneev S.I. China's aluminum industry and prospects for the global aluminum industry. *Tsvetnye Metally*, 2021, no. 4, pp. 5–11. (In Russ.) DOI: 10.17580/tsm.2021.04.01.
26. Sidrak Y.L. Control of counter-current washing operation in alumina production; classical and optimal solutions. *Control Engineering Practice*, 1996, vol. 4, Iss. 1, pp. 73–79. DOI: 10.1016/0967-0661(95)00208-5.
27. Sidrak Y.L. Control of the thickener operation in alumina production. *Control Engineering Practice*, 1997, vol. 5, Iss. 10, pp. 1417–1426. DOI: 10.1016/S0967-0661(97)00138-X.
28. Licheng Wang, Yanxing Tian, Yu Qi, Yiwei Gao, Mengya Wang. Suspension quality and power consumption of the complex multiphase flow field in a draft-tube stirred reactor. *Particuology*, 2021, vol. 56, pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.partic.2020.10.008.
29. Bekker A.V., Li T.S., Livk I. Dynamic response of a plant-scale gibbsite precipitation circuit. *Hydrometallurgy*, 2017, vol. 170, pp. 24–33. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.06.002.
30. Bekker A.V., Li T.S., Livk I. Understanding oscillatory behaviour of gibbsite precipitation circuits. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, vol. 101, pp. 113–124. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.07.006.
31. Mingchun Li, Yusheng Wu. Dynamic simulation of periodic attenuation in seeded precipitation of sodium aluminate solution. *Hydrometallurgy*, 2012, vol. 113–114, pp. 91–97. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.12.004.

32. Xiaoli Wang, Yalin Wang, Chunhua Yang, Degang Xu, Weihua Gui. Hybrid modeling of an industrial grinding-classification process. *Powder Technology*, 2015, vol. 279, pp. 75–85. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.03.031.
33. Yongfang Xie, Simi Wei, Xiaoli Wang, Sen Xie, Chunhua Yang. A new prediction model based on the leaching rate kinetics in the alumina digestion process. *Hydrometallurgy*, 2016, vol. 164, pp. 7–14. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.05.005.
34. Llanos C.E., Sánchez M.C. An efficient methodology to select high-performance M-estimators for robust data reconciliation. *Computers & Chemical Engineering*, 2023, vol. 176, pp. 108297. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2023.108297.
35. Xiaoli Wang, Pan Xiong, Kaixuan Sun, Yongfang Xie, Chunhua Yang. Modeling and simulation of an industrial falling film evaporator for alumina production. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, vol. 154, pp. 303–315. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.10.038.
36. Xie Sen, Wang Huaizhi, Peng Jianchun, Liu Xiaoli, Yuan Xiaofeng. A hierarchical data reconciliation based on multiple time-delay interval estimation for industrial processes. *ISA Transactions*, 2020, vol. 105, pp. 198–209. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.06.001.
37. Guiting Hu, Luping Xu, Zhengjiang Zhang. Correntropy based Elman neural network for dynamic data reconciliation with gross errors. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2022, vol. 140, pp. 104568. DOI: 10.1016/j.jtice.2022.104568.
38. Zaitseva N.M., Manusov V.Z. Creating an intelligent management environment for a powerful load node on the example of the Pavlodar region. *Bulletin of the Innovative University of Eurasia*, 2023, no. 2 (90), pp. 122–131. (In Russ.) DOI: 10.37788/2023-2/122-131.
39. Chai Q.Q., Yang C.H., Teo K.L., Gui W.H. Optimal control of an industrial-scale evaporation process: sodium aluminate solution. *Control Engineering Practice*, 2012, vol. 20, no. 6, pp. 618–628. DOI: 10.1016/j.conengprac.2012.03.001.
40. Lingshuang Kong, Yanyan Yin, Chunhua Yang, Weihua Gui, Kok L.T. Stochastic optimization for real-time operation of alumina blending process. *Journal of Process Control*, 2020, vol. 96, pp. 49–56. DOI: 10.1016/j.jprocont.2020.10.005.
41. Chunhua Yang, Weihua Gui, Lingshuang Kong, Yalin Wang. A two-stage intelligent optimization system for the raw slurry preparing process of alumina sintering production. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, vol. 22, Iss. 4–5, pp. 786–795. DOI: 10.1016/j.engappai.2008.11.003.
42. Chunhua Yang, Weihua Gui, Lingshuang Kong, Yalin Wang. Modeling and optimal-setting control of blending process in a metallurgical industry. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, vol. 33, no. 7, pp. 1289–1297. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.01.005.
43. Rangaiah G.P., Saha P., Tade M.O. Nonlinear model predictive control of an industrial four-stage evaporator system via simulation. *Chemical Engineering Journal*, 2002, vol. 87, no. 3, pp. 285–299. DOI: 10.1016/S1385-8947(01)00240-6.
44. Yao Yao, Jinliang Ding, Chunhui Zhao, Yonggang Wang, Tianyou Chai. Data-driven constrained reinforcement learning for optimal control of a multistage evaporation process. *Control Engineering Practice*, 2022, vol. 129, pp. 105345. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105345
45. Tianyou Chai, Haibo Li, Hong Wang. An intelligent switching control for the intervals of concentration and flow-rate of underflow slurry in a mixed separation thickener. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, vol. 47, Iss. 3, pp. 338–345. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02114.
46. Zakharkin M.A., Kneller D.V. Application of advanced process control (APC) methods and tools. *Datchiki & Sistemi (Sensors & Systems)*, 2010, no. 10, pp. 57–71. (In Russ.)
47. Atunwu J.C., Cao Y., Rangaiah G.P., Tade M.O. Identification and predictive control of a multistage evaporator. *Control Engineering Practice*, 2010, vol. 18, Iss. 12, pp. 1418–1428. DOI: 10.1016/j.conengprac.2010.08.002.
48. Yonggang Wang, Xinfu Pang, Zailin Piao, Jingjing Fang, Jun Fu, Tianyou Chai. Intelligent Decoupling PID Control for the Forced-circulation Evaporation System. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol. 23, no. 12, pp. 2075–2086. DOI: 10.1016/j.cjche.2015.09.008.
49. Zaytseva N.M. Increase of energy efficiency of alumina production on the basis of process modeling. *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*. Tomsk, 1–4 December 2015. Tomsk, IEEE Publ., 2015. pp. 1–4.
50. Zaytseva N.M. Solution of the problem of searching for an energy-efficient functioning mode of a continuous production using simulation and artificial intelligence methods. *Proceedings of 2016 International Conference APEIE*. Novosibirsk, 3–6 October 2016. Novosibirsk, IEEE Publ., 2016. Vol. 2, pp. 250–254.
51. Zaytseva N.M. Operational control of energy-intensive nonlinear inertial production. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2012, no. 1–2, pp. 161–167. (In Russ.)
52. Zadeh L. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, no. 8, pp. 338–353.
53. Piegat A. *Fuzzy modelling and control*. Heidelberg, New York, Physica Verlag, 2001. 728 p.

Information about the authors

Natalya M. Zaytseva, Dr. Sc., Professor, Toraigyrov University, 64, Lomov street, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan. zaitzevns@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3779-0555>

Irina Yu. Semykina, Dr. Sc., Associate Professor, Director of the Educational and Scientific Center for Educational Information Technologies, Sevastopol State University, 33, Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russian Federation. arinasemykina@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6874-1735>

Received: 11.03.2024

Revised: 03.04.2024

Accepted: 21.10.2024