

УДК 669.041: 536.2.001.573:621.365.3.

И.Труфанов, докт.техн.наук; А.Чубаров;

Е.Ксендзюк; Л.Богданова

Запорізький національний технічний університет

## ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ГАЗОПЫЛЕУДАЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОАО ЗАПОРОЖАЛЮМИНИЙ

Проводится теоретическое обоснование разработки параметров экстремальной адаптивной системы регулирования координат газопылеудаления алюминиевого производства.

### Введение

Современное производство алюминия базируется на технологических процессах, упрощенная технологическая схема которых приведена на рис.1

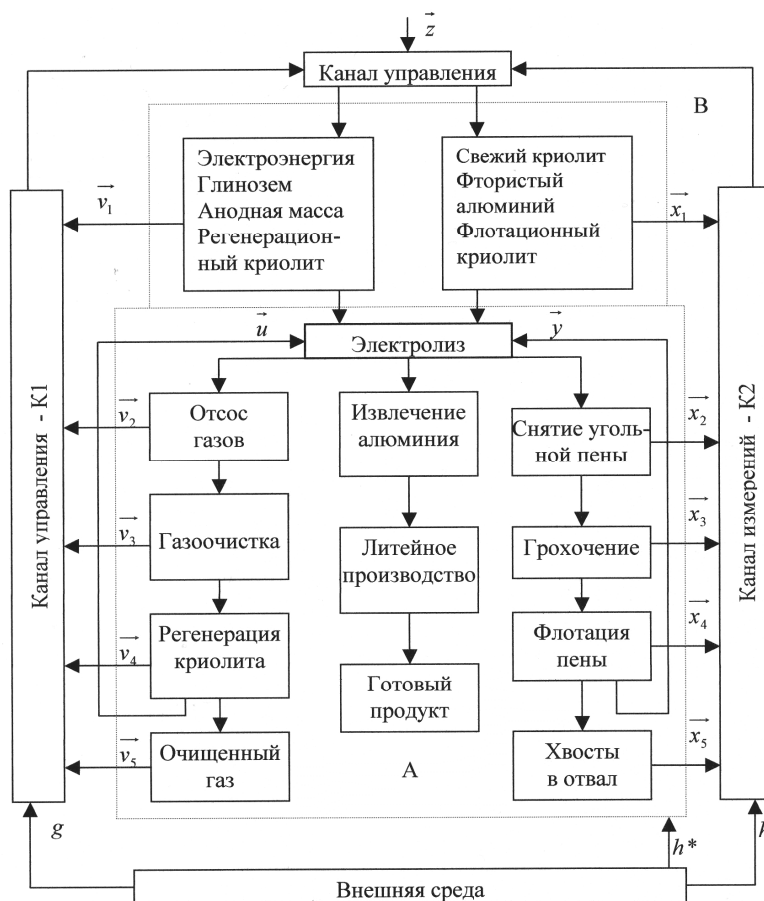


Рисунок 1 – Технология производства алюминия. Схема функциональная

**II міжнародна науково-технічна конференція**

---

{B} – объект управления:

$\vec{v} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  - входные параметры (переменные);

$\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  - выходные переменные; {A} – управляющая часть системы;  $\vec{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  - выходные переменные;  $\vec{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  - управляющие воздействия на объект;  $K_1, K_2$  - каналы связи управляющей части с объектом и измерений соответственно;

$\vec{z} = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$  - помехи, воздействующие на объект управления;

$\vec{h}^* = \{h_1^*, h_2^*, \dots, h_n^*\}$  - помехи, воздействующие на канал управления.

Данные переменные описывают внутренние шумы системы, неконтролируемые влияния внешней среды:  $\vec{g} = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ ,

$\vec{h} = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$  - помехи, существующие в каналах связи  $K_1$  и  $K_2$ .

Математическое описание электролитического процесса плавления алюминия базируется на основе термохимического дифференциального уравнения [1] вида

$$U_{Al_2O_3} - T \frac{dA_2}{dt} = U_{(Al_2F_4SO_4; NaF, H_2O)} - T \frac{dA_1}{dt} \quad (U - \text{полная энергия по}$$

термомеханическим определениям соответственно глинозема и криолита; A - свободная энергия образования составляющих процесса; T - температурный коэффициент - постоянная времени).

На основе данного уравнения и параметров системы (рис.1) разрабатывается функциональная модель связи выхода  $\vec{Y}$  с ее неуправляемыми  $\vec{X}, \vec{E}$  и управляемыми  $\vec{U}$  входами в моменты времени  $\tau$   $\vec{Y}(\tau) = F[\vec{X}(t), \vec{U}(\tau), \vec{E}(\tau), \tau]$ , а также и набора технологических операций, указывающих, как, располагая информацией о входах X, E и U, определить выход  $\vec{Y}$ , не обращаясь к реальной системе [2]. Данный этап связан с определением управления  $\vec{U}$  для достижения заданной цели  $\vec{Z}$  управления системой с помощью модели F системы. При этом кроме цели  $\vec{Z}$  используется информация о состоянии внешней среды  $\vec{X}, \vec{E}$  (электроэнергия, глинозем и др.; криолит и др. – рис.1) и выделенных ресурсах управления в виде ограничений, накладываемых на управление  $\vec{U}$ . Алгоритм управления отражает алгоритмы коррекции параметров  $\vec{X}, \vec{E}$  на различных этапах времени работы системы. Современное электрометаллургическое предприятие по производству алюминия является иерархической системой, поэтому алгоритмы простейшей коррекции, связанной с коррекцией управления и параметров модели, требуют коррекции

### "СВІТЛОТЕХНІКА Й ЕЛЕКТРОТЕХНІКА: ІСТОРІЯ, ПРОБЛЕМИ Й ПЕРСПЕКТИВИ"

параметров раздела системы и внешней среды. Современные системы по ряду причин (в т.ч. значительное изменение свойств внешней среды и самой системы, стадии очистки газов, технического обеспечения скрубберов, системы сухой очистки: воздуходувок, аэролифтов, сжатого воздуха, вытяжной системы и др.) образует адаптивную систему экстремального типа. В данном случае должно рассматриваться несколько вариантов объекта управления:  $\vec{Y} = F_1^0(\vec{X}_1, \vec{E}_1, \vec{U}_1, \tau)$ ;  $\vec{Y} = F_1^0[F_2^0(\vec{X}_2, \vec{E}_2, \vec{U}_2, \tau), \vec{E}_1, \vec{U}_1, \tau]$  и т.д.

Первый вариант обладает значительным преимуществом в виде всего одного фактора неопределенности  $\vec{E}_1$ , для которого проще найти математическое описание (вид  $F_1^0$ ) и малое число управлений. Недостатком является малая управляемость, т.к. вход  $\vec{X}_1$  неуправляемый. При втором варианте  $\vec{Y} = F_1^0[F_2^0(\cdot)]$  преимуществом является возможность (хотя бы частичная) управления входом  $\vec{X}_1$ , который непосредственно воздействует на состояние  $\vec{Y}$ , что достигается с помощью дополнительного канала  $\vec{U}_2$ . Недостатком данного варианта является расширение фактора неопределенности за счет введения дополнительного неконтролируемого возмущения  $\vec{E}_2$ ; усложнение модели системы, т.к. необходимо дополнительно описывать присоединенную часть  $F_2^0$ ; увеличение каналов управления, что расширяет возможности управления, но требует увеличения ресурсов.

С методологической точки зрения используются два основных подхода в математическом моделировании: метод «черного ящика» на локальном уровне АСУТП и *стохастический* (дисперсионный, регрессионный, корреляционный) *метод планирования эксперимента*:  $[A][\vec{X}_{ex}(\tau), \vec{Y}(\tau)] = 0$ . Данный аналитический метод базируется на основе декомпозиции поставленной задачи. Между моделями  $[A][\vec{X}_{ex}(\tau), \tau]$  и  $[A][\vec{Y}(\tau), \tau]$  устанавливаются, применительно к условиям верхнего уровня иерархии управления. В данном случае уравнение термодимического уравнения в виде уравнения энергии тепло-массоносителя в форме интегрального уравнения Винера-Хопфа [2,5].

Для обеспечения нормальной работы электролизера необходимо поддерживать технологические параметры электролиза в заданных пределах, для чего проводится ряд технологических операций: пробивка корки электролита, загрузка сырья и материалов; ликвидация анодных эффектов; поддержание уровня электролита и корректировка его состава; перетяжка анодной рамы; загрузка анодной массы; выливка металла; устранение возможных нарушений

## II міжнародна науково-технічна конференція

технологического режима. Ниже приводится технологическая схема производства алюминия.

Основным сырьем, используемым при электролитическом производстве алюминия, является: окись алюминия  $Al_2O_3$  (глинозем) марок Г-00, Г-0; фтористые соли  $Na_3AlF_6$  (криолит);  $AlF_3$  (фтористый алюминий) анодная масса. В глиноземе, потребляемом при электролизе алюминия, должно быть минимально возможное содержание окислов железа, кремния и других более электроположительных, чем алюминий элементов, так как, выделяясь вместе с алюминием при электролизе на катоде, эти элементы ухудшают качество алюминия. Нежелательно также присутствие в глиноземе окислов щелочных и щелочноземельных металлов. Повышенное содержание окислов калия отрицательно сказывается и на сроке службы угольных подин электролизеров. Нежелательно присутствие в глиноземе влаги, которую образует  $AlF_3$ , вредные для здоровья HF (фтористый водород), и повышает расход дорогостоящего  $AlF_3$ . Особые требования предъявляются к фазовому составу глинозема. Присутствие в техническом глиноземе 25 – 15 %  $\lambda - Al_2O_3$  обуславливает его хорошую устойчивость против насыщения влагой и необходимую скорость растворения его в расплавленном электролите. Растворимость глинозема уменьшается по мере увеличения содержания в нем  $\lambda$ -модификации. При электролизе желателен равномерный по крупности кристаллов. Лучшей растворимостью обладает более мелкий глинозем, однако при электролизе происходит сильное его распыление, что приводит к безвозвратным его потерям. Крупнокристаллический глинозем меньше пылит, однако зачастую медленнее растворяется в электролите, образуя осадки на подине. Расплавленной средой, в которой осуществляется электролиз алюминия, служит криолит  $Na_3AlF_6$  или  $3NaF_3 \cdot AlF_3$ . Одной из необходимых добавок к криолиту при электролизе алюминия является фтористый алюминий  $AlF_3$ . Чистота криолита и фтористого алюминия имеет большое значение для процесса электролиза. Присутствие окислов элементов с более положительными, чем у алюминия потенциалом ( $FeO$ ,  $SiO_2$ ) должно быть минимальным, так как эти элементы выделяются в процессе электролиза на катоде. Присутствие  $H_2O$  и анионов  $SO_4^{2-}$  тоже должно быть ограничено, так как они разлагают электролит в расплавленном состоянии, нарушая соотношение между фтористым натрием и фтористым алюминием.

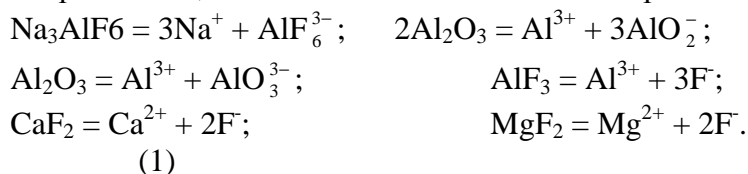
В процессе электролиза алюминия, помимо свежих фтористых солей, широко используются флотационный и регенерированный криолиты, полученные из удаляемой из электролитов при технологическом обслуживании электролизеров угольной пены, и из

растворов, поглинаючих в газоочистних спорудах виділяючіся в процесі електролізу фтористий водород і солі.

Влияние составных частей анода и его режима работы на процесс электролиза. Анодная масса изготавливается из пекового или нефтяного кокса и каменноугольного пека. К качеству анодной массы предъявляются требования по содержанию золы (не более 1%), серы (не более 1,4%), а также пластичности. При расплавлении в аноде жидкая масса должна хорошо растекаться, но в то же время не образовывать отстоев пека. Анод, сформованный из массы с повышенным содержанием пека, имеет пористую структуру, трещины, выделяет в атмосферу корпуса большое количество смолистых веществ и приводит к повышенному расходу анодной массы. Содержание пека регламентируется пластичностью массы и обычно поддерживается для ванн с боковым токоподводом в пределах 27–29 % [8].

Состав электролита и его влияние на параметры электролиза. Основой электролита электролизеров является раствор глинозема в расплавленном криолите. Растворимость глинозема в криолите при 950°C 15%. Растворение глинозема сопровождается его ионизацией, протекающей с отщеплением иона алюминия  $Al^{3+}$ . Криолитоглиноземный расплав не содержит соединений металлов, имеющих меньшее напряжение разложения, чем  $Al_2O_3$ , не взаимодействует химически с углеродистыми материалами, не разлагается при температурах электролиза, обладает хорошей электропроводностью и умеренной летучестью. В состав электролита кроме криолита и глинозема входят  $AlF_3$  (3–6%),  $CaF_2$  (2–4%),  $MgF_2$  (до 5%), иногда  $NaCl$  (2–4%) и  $LiF$  (до 5%). Эти вещества входят в электролит для улучшения его технологических свойств, т.е. оптимальные условия для высокоэффективного получения алюминия и уменьшения частоты анодных вспышек.

Криолитоглиноземные расплавы состоят в основном из ионов, а не из нейтральных молекул, так как вещества, входящие в состав этих расплавов, в значительной степени ионизированы:



Электролит действующего электролизера всегда содержит примеси  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CuO$ ,  $V_2O_5$ ,  $SO_4^{2-}$  и др., поступающие с глиноземом, фтористыми солями и анодной массой. Все эти примеси также ионизируются в расплаве и удаляются в процессе электролиза, поэтому они не накапливаются в электролите, и их содержание не превышает десятых и сотых долей процента.

## II міжнародна науково-технічна конференція

Криолитовое отношение электролита. Криолит можно рассматривать не только как натриевую соль фторалюминиевой кислоты  $\text{NaAlF}_6$ , но и как соединение трех молекул фтористого натрия с одной молекулой фтористого алюминия  $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$ . Отношение числа молекул фтористого натрия к числу молекул фтористого алюминия в расплаве назовем криолитовым отношением.

Криолитовое отношение электролита один из важных технологических факторов электролизного технологического процесса, влияющих на производительность электролизера, т.к. именно криолит взаимодействует с глиноземом, анодом, катодом и другими примесями, впоследствии чего получается алюминий с определенными свойствами, зависящими от выходных параметров вышеприведенного оборудования электролизера. Без качественного криолита процесс электролиза будет происходить не по нормам, что приведет к снижению производительности электролизера, вследствие чего производительность будет ниже возможной. При отсутствии достаточного количества криолита возникают анодные эффекты, которые приводят к энергетическим потерям и износу оборудования, в частности, анода. В производстве алюминия применяют кислые электролиты, криолитовое отношение которых 2,6 – 2,8, что является оптимальным.

Температура плавления электролита. При нагревании твердого электролита его плавление происходит в том же интервале температур, что и кристаллизация жидкого электролита - в начале плавятся легкоплавкие части, затем, при более высоких температурах, тугоплавкие. Таким образом, температура, при которой твердый электролит полностью превращается в расплав, совпадает с температурой начала кристаллизации этого расплава, откуда следует, что из-за присутствия разнообразных добавок процесс электролиза происходит дольше, хотя некоторые из этих добавок снижают температуру плавления до оптимальной, поэтому необходимо определить процент добавок, который должен содержать электролит. Для нормального протекания процесса электролиза требуется некоторый перегрев электролита относительно его точки кипения. Практика показывает, что для этого достаточно 5 – 10°C, хотя в некоторые периоды работы ванны перегрев может составлять более 100°C. Очевидно, что режим работы электролизера с наименьшим перегревом электролита наиболее экономичен, т.к. чем ниже температура, тем меньше тепла теряет электролизер, меньше фтористых солей улетучивается с поверхности электролита и тем выше производительность электролизера. Если электролизер работает на минимальном перегреве электролита, то температура ванны будет зависеть от температуры его плавления - чем ниже точка плавления электролита, тем при меньшей температуре можно вести процесс при

одном и том же перегреве (температура плавления криолита 1010°C). Добавки глинозема в криолит снижают температуру плавления расплава примерно на 5°C на каждый процент Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Расплав, содержащий 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, плавится около 935°C. Известно, что содержание глинозема в электролите действующих электролизеров 4 – 8%, поэтому электролиты состоящие только из криолита и глинозема, имеют температуру плавления 970 – 990°C, а температура процесса с такими электролитами при условии, что перегрев минимален, примерно 1000°C. Электролизеры не могут работать экономично при такой температуре, поэтому ее снижают, вводя в электролит добавки различных фтористых солей. Добавки фтористого алюминия понижают температуру плавления расплава примерно на 10°C на каждые 3% AlF<sub>3</sub> к массе криолитоглиноземного расплава, кроме того AlF<sub>3</sub> затрудняет разряд ионов натрия на катоде, что благоприятно сказывается на производительности электролизеров. Однако AlF<sub>3</sub> уменьшает растворимость глинозема в электролите, увеличивает сопротивление электролита и его текучесть, поэтому количество AlF<sub>3</sub>, дополнительно вводимое в криолитоглиноземный расплав, ограничивают 6%, что соответствует криолитовому отношению 2,6.

Фтористый кальций понижает температуру плавления электролита в той же степени, что и AlF<sub>3</sub>: от каждого процента добавленного CaF<sub>2</sub> температура снижается на 3 – 3,5°C. Фтористый кальций редко вводят специально, так как соединения кальция в виде примеси содержится в сырье и материалах, загружаемых в электролизеры.

Эффективность добавки MgF<sub>2</sub> несколько выше, чем CaF<sub>2</sub>: 1% MgF<sub>2</sub> понижает температуру плавления электролита на 5°C. Однако суммарное содержание MgF<sub>2</sub> и CaF<sub>2</sub> не должно превышать 8%, иначе снизится растворимость глинозема и увеличится плотность электролита. Температуру плавления электролита можно снизить также добавками NaCl и LiF, которые пока не получили большого распространения.

Плотность электролита. Так как алюминий в электролизерах накапливается под слоем электролита, разница между плотностями расплавленного алюминия и электролита должна быть как можно больше. Если разница будет невелика, алюминий может всплыть на поверхность электролита и замкнуть катод с анодом накоротко. Плотность алюминия чистоты 99,75% в точке его плавления 659°C составляет 2,382 г/см<sup>3</sup>, а при более высокой температуре может быть найдена по уравнению

$$P_t = 2,382 - 0,000273(t - 659). \quad (2)$$

Плотность расплавленного электролита зависит от криолитового отношения, содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и солевых добавок.

## II міжнародна науково-технічна конференція

Добавки  $\text{CaF}_2$  и  $\text{MgF}_2$  повышают, а  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{NaCl}$  и  $\text{LiF}$  понижают плотность расплавленного электролита. Плотность электролита промышленных электролизеров колеблется в пределах 2,085 – 2,125 г/см<sup>3</sup> при рабочих температурах и криолитовом отношении 2,4 – 2,7. Как видно, плотность электролита в действующих электролизерах примерно на 10% ниже плотности алюминия при тех же температурах. Однако плотность электролита изменяется с температурой быстрее, чем плотность расплавленного алюминия: с понижением температуры на 10°C плотность электролита изменяется на 0,01 г/см<sup>3</sup>, а плотность алюминия только на 0,003 г/см<sup>3</sup>. Поэтому значительное снижение температуры может привести к выравниванию плотностей и всплыванию алюминия.

Электропроводность электролита. Сопротивление электролита в значительной мере определяет расход электроэнергии в процессе электролиза, т.к. составляет около 1/3 общего сопротивления электролизера. При выборе электролита важно, чтобы он был как можно более электропроводен, однако не любое уменьшение удельного электросопротивления электролита полезно для процесса. Например, с повышением температуры сопротивление электролита уменьшается, но возрастает растворимость алюминия в электролите и скорость его окисления на аноде; с повышением концентрации  $\text{NaF}$  удельное электросопротивление электролита понижается в ущерб производительности электролизера; добавки  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{CaF}_2$  и  $\text{MgF}_2$ , наоборот, увеличивают сопротивление электролита, но делают возможной работу при более низкой температуре. Энергетические потери на преодоление добавочного сопротивления в этом случае окупаются ростом производительности электролизеров. Приведенное выше, не означает, что попытка понизить удельное сопротивление электролита обречена на неудачу. Очень перспективны электролиты, содержащие добавки хлористого натрия ( $\text{NaCl}$ ) и особенно фтористого лития ( $\text{LiF}$ ). Удельное сопротивление электролита, чаще всего применяемого в производстве (криолитовое отношение 2,5 – 2,7, содержание  $\text{CaF}_2$  4 – 6 %), при 950°C составляет 0,005 – 0,007 Ом·м. С повышением температуры на каждые 10°C удельное сопротивление электролита уменьшается на 2 – 3 %. Каждый процент  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в электролите увеличивает его удельное сопротивление примерно на 1,5 %. [9]

Характеристики электродных процессов при электролизе.

Напряжение разложения. Рассмотрим процессы, протекающие на электродах при электролизе криолитоглиноземного расплава, содержащего добавки  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{CaF}_2$  и  $\text{MgF}_2$ . Если к электролизеру подвести постоянное напряжение и плавно изменять его от нуля до нескольких вольт, то начиная с 1,3В в электролизере появляются

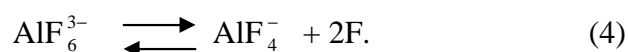


первые признаки электролитического разложения (выделение газа на аноде, протекание тока через электролит). Минимальное напряжение, при котором происходит электролитическое разложение вещества называется его напряжением разложения (для глинозема - 1,3В). Каждое вещество, входящее в состав электролита NaF или CaF<sub>2</sub> имеет свое значение напряжения разложения, но оно выше, чем напряжение разложения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, этим и объясняется отсутствие кальция в расплавленном алюминии и фтора в анодных газах при нормальном течении электролиза. [10].

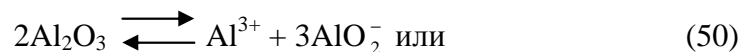
Катодные и анодные процессы на электролизере. При электролитическом получении алюминия электролит состоит в основном из криолита и глинозема. Расплавленный криолит диссоциирует на ионы:



Анион AlF<sub>6</sub><sup>3-</sup> также частично диссоциирует:



Глинозем при растворении в криолите диссоциирует на ионы:



В электролите присутствуют в основном катионы натрия и алюминия.

Алюминий электроположительнее натрия, поэтому первым выделяется на катоде:  $\text{Al}^{3+} + 3 \bar{e} \longrightarrow \text{Al}$ . Кроме этого процесса, возможен также неполный разряд Al<sup>3+</sup> с образованием одновалентного иона алюминия  $\text{Al}^{3+} + 2 e \longrightarrow \text{Al}^+$ .

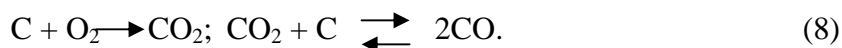
Разряд одновалентного иона на катоде сопровождается выделением металла  $\text{Al}^+ + e \longrightarrow \text{Al}$ . Вследствии того, что при большой концентрации ионов натрия и высокой температуре разница между напряжением разложения NaF и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> мала, на катоде может выделяться металлический натрий  $\text{Na}^+ + e \longrightarrow \text{Na}$ . Образование одновалентного алюминия и выделение натрия при электролизе криолитоглиноземных расплавов являются паразитическими процессами, приводящие к потерям металла, т.е. к снижению производительности электролизера.

## II міжнародна науково-технічна конференція

На аноде происходит разряд кислородосодержащих анионов:



Кислород взаимодействует с углеродом анода по реакции:



Если суммировать катодные и анодные реакции, протекающие при разложении глинозема, то процесс электролиза можно записать в таком виде:



Вследствие изменения параметров электролиза возникает анодный эффект: при понижении концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в электролите до 1–1,5% нормальный процесс электролиза прекращается и на электролизере возникает анодный эффект. Проявляется это в резком возрастании напряжения от 4,3–4,5В до 50–60В. На границе анод–электролит возникает микродуговой процесс: ток от анода к электролиту передается в основном через плазму микродуг. Анодный эффект наступает тогда, когда плотность тока на аноде становится выше критической. В процессе электролиза растворенный в электролите глинозем вырабатывается, соответственно снижается концентрация ионов  $\text{AlO}_2^-$  и  $\text{Al}_3^{3-}$ , ухудшается смачиваемость анода электролитом, газовые пузырьки труднее отделяются от поверхности анода (прилипают к ней), увеличиваются в размерах, при этом электролит газовыми пузырьками отесняется от поверхности анода, и меньшая его площадь соприкасается с электролитом; анодная плотность тока становится равной критической, газовые пузырьки сливаются, образуя на поверхности анода тонкую пленку; электрическое сопротивление резко возрастает на границе анод–электролит, напряжение на электролизере мгновенно возрастает. При выработке глинозема из электролита снижается и концентрация анионов  $\text{AlO}_2^-$  и  $\text{AlO}_3^{3-}$ . Вследствие этого возникает так называемая концентрационная поляризация, вызывающая резкое увеличение потенциала анода относительно расплава. Становится возможным разряд ионов фтора по реакции:

$4\text{F} + \text{C} - 4\bar{e} \longrightarrow \text{CF}_4$ . Газообразный четырехфтористый углерод улетучивается из электролизера через твердые промежуточные соединения углерода и фтора, которые имеют очень высокое электрическое сопротивление. Когда такой пленкой покрывается поверхность анода, сопротивление резко возрастает, напряжение

увеличивается. После растворения в электролите новой порции глинозема анодный эффект на электролизере с нормальным ходом прекращается. Часто для ликвидации вспышки после добавления глинозема необходимо кратковременное снижение плотности тока на электролизере. Это достигается замыканием части анода на металл путем взбалтывания катодного алюминия с помощью шумовки или деревянной жерди [8].

Рассматривая поток газомассопереноса как сухой «раствор» [11,12], концентрацию натриевых соединений (3) и углерода анода можно представить

$$C_{Na^-} = \frac{1}{A} C, \quad (10)$$

где  $A = const$ , равная концентрации активных элементов [11]  $Al, F, O_2$  и др.;  $C$  - концентрация  $Na$  или  $F$ .

Работа, совершаемая разделением активных элементов при движении газомассопотока, будет равна [13]:

$$P = \alpha RT \lg C/x + \alpha RT \lg \frac{C}{X-A} = 0, \quad (11)$$

где  $RT$  – тепловая константа;  $x$  – путь автономного движения активного элемента;  $A$  – концентрация заряженных частиц [12].

Из (11) имеем:  $x^2 - Ax - C^2 = 0$  или  $x = A/2 + \sqrt{A^2/4 + C^2}$ .

Концентрация фтора  $F$  будет равна  $(X - A) = -A/2 + \sqrt{A^2/4 + C^2}$ . В состоянии активного контакта активных соединений по (3)-(9) уравнение (11) принимает вид:

$$P = 2\alpha RT \lg \frac{x}{C} + \alpha RT \lg \frac{C}{y} = 0, \quad (12)$$

где  $x, y$  – координаты ( $x$  – продольная,  $y$  – поперечная массопотока);  $\alpha$  – доля (соотношение  $Na, F$ ). Связь между этими координатами  $x^2 / y = C$ . Работа, совершаемая при проведении реакций (3)-(9) равна [13]:

$$P = \frac{\alpha}{z_1} RT \lg \frac{a_1}{a_1} + \frac{\alpha}{z_2} RT \lg \frac{a_2}{a_2} = 0, \quad (13)$$

где индексы 1,2 обозначают элементы: 1 –  $Na$ , 2 –  $F$ , отсюда следует энергетическое соотношение

$$\left( \frac{a_1}{a_1} \right)^{1/z_1} = \left( \frac{a_2}{a_2} \right)^{1/z_2} \quad \text{или} \quad \frac{a_1^{1/z_1}}{a_2^{1/z_2}} = \frac{a_1^{1/z_1}}{a_2^{1/z_2}}, \quad (14)$$

## II міжнародна науково-технічна конференція

откуда работа при переведении потока из одного энергетического поля в другое, будет равна [13]:

$$P = \frac{\alpha}{z_+} RT \frac{a_+}{a_+} + \frac{a}{z_-} RT \lg \frac{a_-}{a_-} = 0, \quad (15)$$

откуда следует  $a_+^{1/z_+} + a_-^{1/z_-} = a_+^{1/z_+} + a_-^{1/z_-}$ , т.е. произведение энергетической активности соединений  $Na$  и  $F$  является постоянным. Если поток не энергонасыщенный, то

$$x + y = -\left(\frac{A^-}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{A^-}{2}\right)^2 + (C_{Na_+} + C_{F_+})^2}. \quad (16)$$

Если расположить по активности побочные химические соединения в порядке: гидроксил- сульфат- хромат- утрат- тартрат- хлорат- арсенат- фосфат- молибдат- ацетат- хлоридбромид-хлоридйодид, то

$$F^+ = x - B = -\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} + C^2}, \quad (17)$$

где  $B$  – концентрация активного элемента в перечисленных химических соединениях. На основании изложенного величина

$$x + y = -\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} + (C_{F_+} + C_{Na_+})^2}. \quad (18)$$

Это соотношение и решение (15) дает уравнение физико-химического равновесия потока газомассопереноса [12]:

$$\frac{x}{m} = Kb_1C_{Na} : (1 + b_1C_F + bC_{Na}), \quad (19)$$

где  $m$  – масса погонного объема газопылевой смеси;  $K$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – константы. Уравнение (19) дает соотношение, которое является основой графического изображения опытных данных:

$$\frac{C_{Na} / C_F}{x / m} = \frac{b_2}{b_{1K}} + \frac{C_{Na}}{KC_F}. \quad (20)$$

На границе раздела активной и пассивной зон [13]

$$E = 2,303 \frac{RT}{L_f} \lg \frac{c}{x} \quad (L_f - \text{соотношение энергетических потенциалов } Na)$$

и  $F$ . Если данное соотношение подставить в уравнение концентраций  $x$  (18), то получим

$$E = \frac{2,303RT}{L_f} \lg \left[ \frac{A}{2C} + \sqrt{1 + \frac{A^2}{4C^2}} \right]. \quad (21)$$

Для значений  $C > A$  величина  $E = 0$ , а при  $C < A$  величина  $dE/d \lg C = 2,303RT/L_f \approx 107$  мВ при  $20^\circ\text{C}$  [11]. Данная величина определяет величину регулируемого энергетического воздействия на газомассопоток алюминиевого производства на единичный погонный объем потока газопылевой смеси. Величина  $dE/d \lg C = 107$  мВ на единичный поток газопылевой смеси получена для значений следующих нормальных электродных потенциалов активных элементов:  $Na = -2,713$ ;  $F = 2,85$ ;  $Al = -1,66$  В.

### **Выводы**

Данная модель и алгоритм управления разрабатываются применительно к следующим условиям [рис.1]: фазовый состав глинозема (25-15)%  $Al_2O_3$ , криолит  $Na_3AlF_6$  или  $3NaF_3 \cdot AlF_3$ ; на 1 т массы расходуется (700-720) кг сухого кокса и (280-300) кг обезвоженного пека; содержание золы не более 1%, соды не более 1,4%; пластичность массы (27-29)%;  $AlF_3$  (3-6)%,  $CaF_2$  (2-4)%;  $MgF_2$  (до 5)%;  $NaCl$  (2-4)%;  $LiF$  (до 5)%; криолитовое отношение электролита (2,6-2,8); температура плавления электролита (15%  $Al_2O_3$ ) – около  $935^\circ\text{C}$ ; содержание глинозема (4-8)%; перегрев расплава до  $1000^\circ\text{C}$ ; добавки  $AlF_3$  - на  $10^\circ\text{C}$  на каждые 3%  $AlF_3$  к массе криолитоглиноземного расплава (6% при криолитовом отношении 2,6); степень понижения 1%  $MgF_2$  - на  $5^\circ\text{C}$  температуры плавления электролита; плотность алюминия чистоты 99,75% в точке плавления  $659^\circ\text{C}$  –  $2,382$  г/см<sup>3</sup>; плотность электролита 2,085-2,125 г/см<sup>3</sup>; изменение плотности электролита на 0,01 г/см<sup>3</sup> при понижении температуры на  $10^\circ\text{C}$ , при этом плотность  $Al$  понижается на 0,003 г/см<sup>3</sup> и др. параметры.

На основании проведенных исследований и анализа результатов получены выводы:

- при понижении концентрации  $Al_2O_3$  в электролите до 1–1,5% нормальный процесс электролиза прекращается и на электролизере возникает анодный эффект, который сопровождается резким повышением напряжения (до 60В), следовательно, выделяется тепло, которое расходуется впустую - износ оборудования, материальные затраты;

## II міжнародна науково-технічна конференція

- обеспечение номинальной температуры разложения глинозема в криолите (940-960°C) является главным фактором качественного и эффективного получения алюминия;
- поддерживание номинального напряжения, количества глинозема и состава криолита обеспечивает технологический процесс получения алюминия с нормальными условиями.

Система экстремального адаптивного управления строится в соответствии с достижениями компьютерных систем [6,7] на основе реализации алгоритмов управления, реализуемых микроконтроллерами [3,4].

*The theoretical substantiation of gas and dust removal coordinates extreme adaptive regulation system parameters development of aluminium manufacture is carried out.*

### **Литература**

1. Федотьев П.П. Электрометаллургия. – Петроград: Научн. хим.-техн. изд-во, 1923. – 164 с.
2. Лисиенко В.Г., Волков В.В., Маликов Ю.К. Улучшение топливоиспользования и управление теплообменом в металлургических печах. – М.: Металлургия, 1988.– 231с.
3. Предко М. Руководство по микроконтроллерам. Том 1. – М.: Постмаркет, 2001. – 416 с.
4. Предко М. Руководство по микроконтроллерам. Том 2. – М.: Постмаркет, 2001. – 488 с.
5. Боровиков В. СТАТИСТИКА: искусство анализа данных на компьютере. – СПб: Питер, 2001. – 656 с.
6. Все необходимое для автоматизации: решения на базе персональных компьютеров. – ADVANTECH: Русское издание. – ProSoft, 2001. – 356 с.
7. Более 50 лет деятельности в области информационных технологий и автоматизации. – Харьков: АОЗТ Тяжпромавтоматика, 2004. – 96 с.
8. Вольфсон Г. Е., Ланкин В. П. Производство алюминия электролизерах с обожженными анодами. – М.: «Металлургия», 1974. – 136 с.
9. Тарарин С. В. Электролиз расплавленных солей. – М.: «Металлургия», 1982. – 224 с.
10. Кузнецов С. И., Эпштейн А. М. Электролитическое производство алюминия. – М.: 1953.- 300 с.
11. Свойства металлов. В 2-х частях. Ч2. Химические свойства. Справочник/ М.М. Антонова, И.Т. Брахнова, А.Л. Борисова и др. – М.: Металлургия, 1976. – 384с.
12. Лыков А.В. Тория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472с.
13. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 320с.
14. Эндриус К., Дайсон Д., Киоун С. Электронограммы и их интерпретация. – М.: Мир, 1971. – 256с.