

УДК 669.713

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЕЙ

© 2013 г. В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова

Институт вычислительного моделирования (ИВМ) СО РАН, г. Красноярск

Институт цветных металлов и материаловедения сибирского  
федерального университета (ИЦМиМ «СФУ»), г. Красноярск

Рассматривается тепловая динамическая модель электролизера и выполнено моделирование некоторых технологических событий. Представлены расчеты изменений технологических параметров после управляющих воздействий.

**Ключевые слова:** тепловая динамическая модель, параметры электролиза, электролизер.

The thermal dynamic model of an electrolytic bath is considered and simulation of some process events has been carried out. The calculations of changes in the process parameters after control action are presented.

**Key words:** thermal dynamic model, electrolytic bath, process parameters.

Эксплуатация современных мощных электролизеров, модификация существующего производства и внедрение новых технологий предполагают улучшение качества управления процессом получения алюминия. Данный процесс не является полностью автоматизированным. Этому препятствуют затрудненность или невозможность измерений большинства параметров работы алюминиевого электролизера, а также недостаточное понимание протекающих в аппарате физико-химических процессов. Поэтому перспективным направлением является разработка новых алгоритмов управления, построенных на понимании и моделировании этого сложного технологического процесса, которые позволят автоматизировать отдельные контуры управления и помогут технологу при принятии решений.

Традиционно в алгоритмах управления электролизом использовались статистические зависимости между параметрами, коэффициенты которых требуют постоянной настройки, так как зависят не только от конструкции, но и от срока службы электролизера и его теплового состояния. Поэтому алгоритмы управления, построенные на статистических зависимостях между переменными,

не получили широкого распространения на производстве.

Для качественного и оптимального управления технологией необходимо использование комплексной динамической математической модели процесса электролиза, адекватно описывающей тепло- и массообмен в электролизере, изменения электробаланса, гидродинамику расплавов. Тепловая модель электролизера является ядром комплексной модели процесса электролитического получения алюминия. Модель для управления при изменении технологических условий должна рассчитать изменения средних температур выделенных областей и поверхностей электролизера, толщины застывшего на бортах электролита (настыли) и высоты слоя жидкой анодной массы.

Для описания динамики средних температур металла, электролита, слоев футеровки и анода используются нульмерные (точечные) модели. Потоки тепла через границы исследуемых областей определяются по одномерным приближениям с учетом фазовых переходов. На рис. 1 выделены области для расчета средних температур электролизера с самообжигающимся анодом.

**Белолипецкий В.М.** – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. отделом вычислительной гидродинамики ИВМ СО РАН (660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44).

**Пискажова Т.В.** – докт. техн. наук, зав. кафедрой автоматизации производственных процессов и теплотехники в металлургии ИЦМиМ «СФУ» (660025, г. Красноярск, пр-т Красноярский рабочий, 95). Тел.: (3912) 90-51-39. E-mail: piskazhova@narod.ru.

Теплообмен в областях глинозема, корки, электролита, металла, подовых блоков и теплоизоляции описывается следующими уравнениями относительно средних температур:

$$\begin{aligned}
 c_3 M_3 (d\hat{T}_3 / dt) &= Q_1 + Q_{ан} - Q_{э-н} - Q_{э-м} - Q_г - Q_p - Q_{э-кор}, \\
 c_m M_m (d\hat{T}_m / dt) &= Q_{э-м} - Q_{м-н} - Q_{м-к}, \\
 c_г M_г (d\hat{T}_г / dt) &= Q_{кор-г} - Q_{г-ат}, \\
 c_{кор} M_{кор} (d\hat{T}_{кор} / dt) &= Q_{э-кор} - Q_{кор-г}, \\
 c_k M_k (d\hat{T}_k / dt) &= Q_{м-к} - Q_{к-дн} + Q_{qк} - Q_{к-борт-ат}, \\
 c_{дн} M_{дн} (d\hat{T}_{дн} / dt) &= Q_{к-дн} - Q_{дн-ат} - Q_{к-борт-ат}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь  $\hat{T}_i$  — средние температуры соответствующих слоев, °С;  $Q_1 = IU$  — приход тепла от электроэнергии в электролите, Вт;  $Q_{ан}$  — теплообмен с анодом, Вт;  $c_i$  — удельные теплоемкости соответствующих материалов, Дж/(кг·град);  $M_i$  — массы соответствующих областей, кг;  $Q_г$  — потери тепла на нагрев и растворение глинозема, Вт;  $Q_p$  — расход тепла на основную реакцию, Вт;  $Q_{qк}$  — тепловой поток от внутреннего источника тепла в катоде, Вт.

Потоки тепла через границы рассматриваемых слоев ( $Q_{i-j}$ ) находятся по приведенным в работе [1] формулам, например:  $Q_{э-н} = S_{э-н} \alpha_{э-н} (\hat{T}_э - T_{лик}^э)$  — тепловой поток из электролита в настыль, где  $T_{лик}^э$  — температура ликвидуса электролита, или  $Q_{э-м} = S_{э-м} k_{э-м} (\hat{T}_э - \hat{T}_м)$  — тепловой поток из электролита в металл и т.д.

Коэффициенты теплоотдачи ( $\alpha_{г-ат}$ ,  $\alpha_{дн-ат}$ ,  $\alpha_{э-н}$ ,  $\alpha_{м-н}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С)) считаются заданными, а коэффициенты теплопередачи ( $k_{кор-г}$ ,  $k_{э-м}$ ,  $k_{м-к}$ ,  $k_{к-дн}$ ) вычисляются по выведенным нами формулам:

$$k_{i-j} = 2 / (\Delta_i / \lambda_i + \Delta_j / \lambda_j),$$

где  $\Delta_i$  — толщина слоя, м;  $\lambda_i$  — теплопроводность, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Рассмотрим моделирование теплопередачи из расплавов через настыль и борт электролизера в зонах электролита и металла. На рис. 2 представлена схема многослойной бортовой стенки и настыли. Последняя контактирует непосредственно с электролитом или металлом, стальной кожух — с окружающей средой.

В области 1 используется только стационарное приближение в силу малой толщины стального кожуха и большого значения коэффициента теплопроводности стали. Для слоев теплоизоляции, угольного блока и настыли решается следующая нестационарная задача:

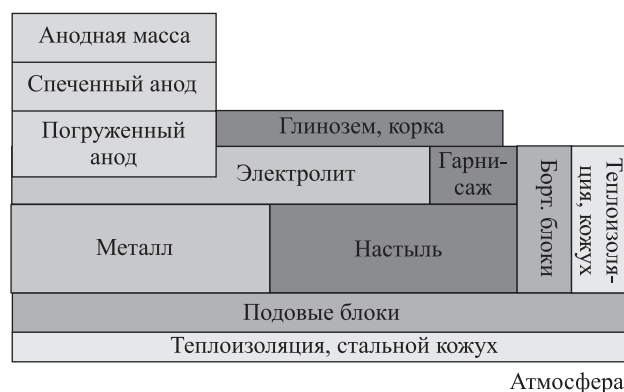


Рис. 1. Схематичное представление электролизера для тепловых расчетов

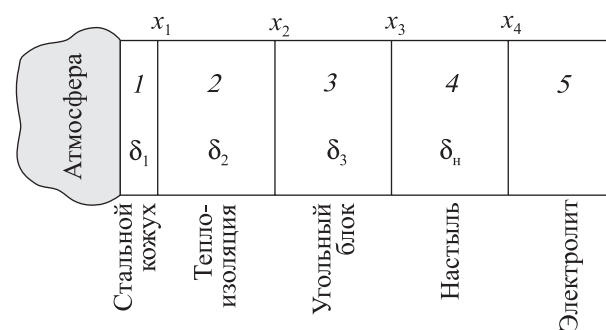


Рис. 2. Схема бортовой стенки

$$\begin{aligned}
 c_2 M_2 (d\hat{T}_2 / dt) &= Q_{3-2} - Q_{2-1}, \\
 c_3 M_3 (d\hat{T}_3 / dt) &= Q_{4-3} - Q_{3-2}, \\
 c_4 M_4 (d\hat{T}_4 / dt) &= Q_{5-4} - Q_{4-3} + Q_{фаз}^{наст}, \\
 &Q_{2-1} - Q_{1-ат}, \\
 Q_{1-ат} &= \alpha_{1-ат} (\hat{T}_1 - T_{ат}) S_{1-ат}, \\
 Q_{2-1} &= k_{2-1} (\hat{T}_2 - \hat{T}_1) S_{2-1}, \\
 Q_{3-2} &= k_{3-2} (\hat{T}_3 - \hat{T}_2) S_{3-2}, \\
 Q_{4-3} &= k_{4-3} (\hat{T}_4 - \hat{T}_3) S_{4-3}, \\
 Q_{5-4} &= \alpha_{э-н} (\hat{T}_э - T_{лик}^э) S_{5-4}, \\
 Q_{фаз}^{наст} &= \rho_n L_n (d\delta_4 / dt) S_{5-4}, \\
 k_{i-j} &= 2 (\delta_i / \lambda_i + \delta_j / \lambda_j)^{-1}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Здесь  $\hat{T}_i$  — среднее значение температуры в  $i$ -м слое, °С;  $S_{i-j}$  — площади соответствующих границ слоев, м<sup>2</sup>;  $Q_{фаз}^{наст}$  — тепло фазового перехода, Вт;  $\rho_n$  — плотность настыли, кг/м<sup>3</sup>;  $L_n$  — скрытая теплота плавления настыли, Дж/кг;  $M_i$  — массы соответствующих областей, кг;  $\delta_i$  и  $\lambda_i$  — толщина и теплопроводность слоев. Считаем, что

$$d\delta_4 / dt \approx (\delta_4^{n+1} - \delta_4^n) / \Delta t,$$

где  $\delta_4^{n+1}$  — толщина настыва на  $n + 1$ -м шаге,  $\delta_4^n$  — ее размер на предыдущем временном шаге.

С использованием условия фазового перехода получено уравнение для динамического расчета толщины настыва:

$$\delta_4^{n+1} = 0,5 \left( \delta_4^n - \frac{\Delta t \alpha_{3-n}}{\rho_n L_n} \right) (\hat{T}_3 - T_{лик}^э) + \sqrt{0,25 \left( \delta_4^n - \frac{\Delta t \alpha_{3-n}}{\rho_n L_n} (\hat{T}_3 - T_{лик}^э) \right)^2 + \frac{2\lambda_4 \Delta t}{\rho_n L_n} (T_{лик}^э - \hat{T}_4)}. \quad (3)$$

Формула (3) для определения значений толщины настыва в металле и электролите отражает связь массового и теплового балансов электролизера, что необходимо для управления химическим составом электролита.

Нами в работе [1] представлена тепловая динамическая модель самообжигающегося анода в виде системы уравнений, аналогичной системе (1), и выведена формула для расчета границы спекания анодной массы, или коксопекковой композиции (КПК):

$$\Delta z_1 = \frac{\lambda_1 z_2 (T_{сп} - \hat{T}_{a1})}{\lambda_1 (T_{сп} - \hat{T}_{a1}) + \lambda_2 (\hat{T}_{a2} - T_{сп})},$$

где  $\Delta z_1$  — высота жидкого слоя анодной массы, так называемая высота КПК, м;  $T_{сп}$  — температура спекания КПК, °C;  $\hat{T}_{a1}$  и  $\hat{T}_{a2}$  — температуры слоев анода, °C;  $z_2$  — высота спекенного анода, м (см. рис. 1).

Параметры «высота КПК» и «температура КПК» являются принципиальными для правильного формирования анода и определения расхода анодной массы, а кроме того, они влияют на количество выбросов с поверхности самообжигающегося анода.

Перед расчетом динамических откликов технологических параметров на воздействие необходимо определить стационарное тепловое состояние электролизера и начальные условия для решения систем дифференциальных уравнений (1) и (2) и системы уравнений для анода. Для этого используются алгебраические системы уравнений для вычисления начальных значений средних температур рассматриваемых областей электролизера, полученные совместным решением систем теплообмена с нулевой правой частью во всех областях. На рис. 3 представлена расчетная схема определения начальных условий для решения динамических систем и стационарных значений тепловых переменных.



Рис. 3. Схема расчета стационарного состояния и начальных условий

Предложена математическая модель нагрева и растворения глинозема при поступлении его через систему автоматической подачи (АПП) с учетом свойств сырья. В работе [2] представлена имитация смены глинозема и показано влияние этого события на работу системы АПП и параметры электролиза.

Моделирование нагрева и растворения глинозема при поступлении его через систему автоматической подачи состоит в решении следующих задач моделирования:

- процесса растворения глинозема на основе экспериментальных данных с учетом свойств разных типов глинозема;
- теплового взаимодействия глинозема с электролитом;
- времени осаждения агломератов глинозема на границу раздела электролит–металл.

Были использованы таблицы экспериментальных данных по времени растворения лабораторной навески глинозема различного типа при различных свойствах электролита. Эти данные были аппроксимированы математическими зависимостями с учетом отличий порции АПП от объема лабораторной навески, скорости движения электролита под пробойником. Теплообмен глинозема с электролитом описывается по закону Ньютона. Изменение концентрации растворенного глинозема за временной шаг  $\Delta t$  определяется по формуле

$$\Delta C = (C_{\infty} - C_1) e^{\frac{t_0 - t}{T} \left( e^{\frac{\Delta t}{T}} - 1 \right)}, \quad (4)$$

где  $t_0$  – момент попадания порции глинозема в электролит, с;  $C_{\infty}$  – концентрация глинозема в электролите после его полного растворения, %;  $T$  и  $C_1$  характеризуют скорость растворения глинозема. Согласно (4) определяется масса ( $\Delta m_t$ ) растворившегося за время  $\Delta t$  глинозема.

В таблице приведены расчеты результатов некоторых управляющих и случайных воздействий на технологические параметры и температуры областей электролизера с самообжигающимся анодом С8БМ.

Рассмотрены следующие воздействия:

- увеличение силы тока;
- возрастание напряжения на электролизере;
- повышение температуры окружающей среды;
- снижение уровня металла.

Результаты расчетов этих воздействий использовались не только для идентификации модели, но и для управления технологией. Все приведенные в таблице температуры понимаются как средние по названной области электролизера.

В таблице числа, ограниченные жирной линией, — это входные переменные для моделирования, а перечисленные ниже ее — расчетные. Так, в графе «Начальные условия» входными переменными для расчета стационарного состояния являются сила тока, температура воздуха, напряжение электролизера, уровни металла и электролита,  $KO$ ,  $CaF_2$ , температура электролита. Этот столбец определяет начальные стационарные значения переменных до моделирования воздействий.

В следующей графе рассматривается результат увеличения тока со 170 до 175 кА без проведения мер по тепловой компенсации. Начальные условия те же, что и в первом столбце. Затем в программу подается управляющее воздействие — увеличение силы тока на 5 кА при неизменных температуре воздуха и напряжении электролизера. Все остальные параметры начинают меняться относительно первоначальных значений.

Под жирной чертой в этом столбце представлен расчет изменения технологических параметров по сравнению с первоначальными. Видно, что в связи с расплавлением настыли уровень металла снизился на 2 см по сравнению с исходным, а электролита увеличился на 6 см, масса возросла почти на 2 т, температуры расплавов повысились на 10 °С. Также произошел разогрев бортов ванны и подовых блоков. Настыль растаяла на 6 см, а толщина гарнисажа

уменьшилась на 1,5 см. Междуполосное расстояние (МПР) при повышении тока вначале снизилось до 5,9 см, но потом, за счет увеличения температуры электролита, изменения его состава и, соответственно, электропроводности, вернулось к исходному значению. Возросла также температура верхней части самообжигающегося анода — анодной массы, в связи с увеличением прихода тепла. Также зафиксировано снижение запаса МГД-стабильности. Следует отметить значительное время отработки этого воздействия — стабилизация расчетных параметров наступила только через 96 ч после увеличения тока.

В следующих трех столбцах рассматриваются результаты влияния изменения напряжения, температуры окружающей среды и уровня металла на переменные электролиза. Измененные управляющие параметры выделены жирным шрифтом, а остальные — соответствуют начальным условиям.

Также были смоделированы технологические операции и события:

- замена анодных штырей;
- установка ребер охлаждения;
- изменение высоты анодного столба и уровня электролита;
- отключение тока серии.

Это позволило выработать новые технологические рекомендации. Например, было показано, что даже незначительное (на 1–2 см) увеличение уровня электролита хорошо охлаждает перегретый расплав, при этом практически не повышая тепловую нагрузку на анод. Это опровергает существующее мнение об опасности увеличения уровня расплава для анода и может служить одним из механизмов регулирования теплового баланса электролизера. Кроме этого, была определена необходимость добавки напряжения на электролизере в зависимости от количества меняемых анодных штырей, показана нецелесообразность сезонного изменения регламентов и даны другие рекомендации.

На основе построенной тепловой модели электролизера разработано алгоритмическое и программное обеспечение для управления химическим составом электролита, которое внедрено и успешно используется на заводах АК «РУСАЛ». Это позволило улучшить качество управления и экономить сырье [3, 4].

Также описанная тепловая модель входит в состав программного комплекса «Виртуальный электролизер», который является инструментом для поддержки принятия технологических решений и дает возможность проводить имитационное моделиро-

### Результаты управляющих воздействий на технологические параметры и температуры областей электролизера С8БМ

Технологические переменные	Обозначения в (1)–(4)	Единицы изм.	Начальные условия	Изменение			
				тока	напряжения	температуры воздуха	металла
Сила тока	$I$	кА	<b>170</b>	<b>175</b>	170	170	170
Температура воздуха	$T_{ат}$	°С	<b>0</b>	0	0	<b>+20</b>	0
Напряжение электролизера	$U$	В	<b>4,45</b>	4,45	<b>4,65</b>	4,45	4,45
Уровень металла	$\Delta_m$	см	<b>48</b>	46	45,2	47,6	<b>43</b>
Уровень электролита	$\Delta_э$	см	<b>18</b>	24	25,4	19,2	19,5
КО	–		<b>2,3</b>	2,44	2,48	2,33	2,33
CaF <sub>2</sub>	–	%	<b>7,0</b>	5,5	5,1	6,7	6,7
Температура электролита	$\hat{T}_э$	°С	<b>958</b>	969	972	960	960
Температура металла	$\hat{T}_м$	°С	955	965	968	957	957
Температура угольного бортового блока в средней зоне	$\hat{T}_3$	°С	238	267	281	247	244
Температура борта катода в средней зоне	$\hat{T}_1$	°С	141	156	164	154	146
Температура угольных подовых блоков	$\hat{T}_к$	°С	947	959	960	950	949
Температура теплоизоляции днища	$\hat{T}_{дн}$	°С	509	515	516	515	511
Температура днища	$T_{дн-ат}$	°С	88	89	89	104	89
Толщина гарнисажа	$\delta_4^{эл-г}$	см	7,2	5,9	5,3	6,9	7,2
Толщина настывли	$\delta_4^{мет}$	см	36	30	28	34,9	34,5
Температура погруженного анода	$\hat{T}_{а3}$	°С	952	963	966	954	955
Температура спеченного анода	$\hat{T}_{а2}$	°С	654	654	650	655	654
Уровень КПК анода	$\Delta z_1$	см	41	39	36	38	41
Температура анодной массы сверху анода	$\hat{T}_{а1}$	°С	257	260	259	267	257
Температура поверхности анода	$T_{а1-ат}$	°С	114	120	119	133	115
Запас МГД-стабильности	–	мВ	572	368	832	563	415
МПР	–	см	6,1	6,1	7,1	6,1	6,2
Масса металла	$M_m$	т	32,6	32,6	32,6	32,6	29,5
Масса электролита	$M_э$	т	7,5	9,4	10,2	7,8	7,9
Масса настывли	$M_n$	т	13,3	10,7	9,8	12,8	11,5
Время стабилизации	–	ч	0	96	82	72	86

вание изменения параметров электролиза при управляющих и случайных воздействиях на процесс или при работе алгоритмов АСУТП [5].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложена разработанная авторами математическая модель теплообмена в алюминиевом электролизере для определения температур областей, отвечающих за показатели эффективности процесса, а также расчета изменения толщины настывли, высоты спекания анода в целях взаимосвязанного управления тепловым и массовым балансами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В., Емельяшин М.В. // Вест. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2006. Вып. 5 (12). С. 19–24.
2. Berezin A.I., Isaeva L.A., Belolipetsky V.M. et al. // Light Metals. 2005. P. 151–156.
3. Piskazhova T.V., Mann V.C. // JOM. 2006. Vol. 58, № 2. P. 48–52.
4. Пискажова Т.В. // Вест. СФУ. Техника и технологии. 2010. Т. 3, № 2. С. 159–170.
5. Пискажова Т.В. // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 41–44.