

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЕЙ

В.М. Белолипецкий^{1,2}, Т.В. Пискажова²

¹*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

Рассматривается тепловая динамическая модель электролизера и моделирование некоторых технологических событий. Описывается алгоритмическое и программное обеспечение для управления химическим составом электролита.

Эксплуатация современных мощных электролизеров, модификация существующего производства и внедрение новых технологий предполагает улучшение качества управления процессом получения алюминия. Процесс не является полностью автоматизированным. Этому препятствует 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. Это дает возможность автоматизировать отдельные контуры управления и оказывать поддержку технологу при принятии решений.

Традиционно в алгоритмах управления электролизом использовались статистические зависимости между параметрами. Коэффициенты таких зависимостей требуют постоянной настройки, так как зависят не только от конструкции, но и от срока службы электролизера, теплового состояния аппарата. 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: изменение средних температур выделенных областей и поверхностей электролизера; изменение толщины застывшего на бортах электролита (настыли), изменение 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.

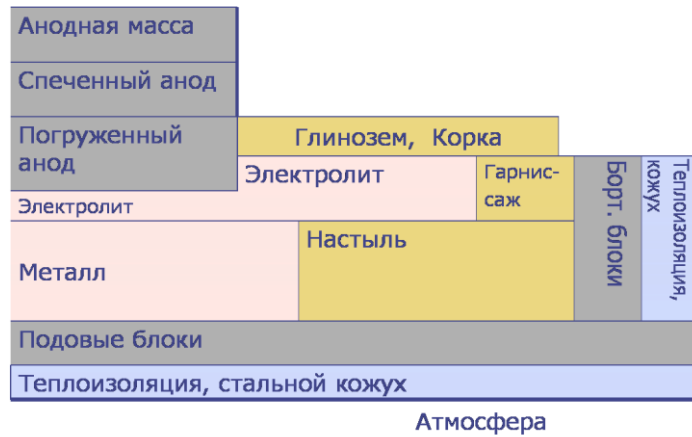


Рис. 1. Схематичное представление электролизера для тепловых расчетов.

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

$$\begin{aligned}
 c_{\text{Э}} M_{\text{Э}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{Э}}}{dt} &= Q_1 + Q_{\text{ан}} - Q_{\text{Э-Н}} - Q_{\text{Э-М}} - Q_{\text{Г}} - Q_{\text{Р}} - Q_{\text{Э-кор}}, \\
 c_{\text{М}} M_{\text{М}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{М}}}{dt} &= Q_{\text{Э-М}} - Q_{\text{М-Н}} - Q_{\text{М-к}}, \\
 c_{\text{Г}} M_{\text{Г}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{Г}}}{dt} &= Q_{\text{кор-Г}} - Q_{\text{Г-ат}}, \\
 c_{\text{кор}} M_{\text{кор}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{кор}}}{dt} &= Q_{\text{Э-кор}} - Q_{\text{кор-Г}}, \\
 c_{\text{к}} M_{\text{к}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{к}}}{dt} &= Q_{\text{М-к}} - Q_{\text{к-дн}} + Q_{\text{qк}} - Q_{\text{к-борт-ат}}, \\
 c_{\text{дн}} M_{\text{дн}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{дн}}}{dt} &= Q_{\text{к-дн}} - Q_{\text{дн-ат}} - Q_{\text{дн-борт-ат}}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь \hat{T}_i - средние температуры соответствующих слоев, Q_1 - приход тепла от электроэнергии в электролите, $Q_{\text{ан}}$ - теплообмен с анодом, c_i - удельные теплоемкости соответствующих материалов, M_i - массы соответствующих областей, $Q_{\text{Г}}$ - потери тепла на нагрев и растворение глинозема, $Q_{\text{Р}}$ - расход тепла на основную реакцию, $Q_{\text{qк}}$ - тепловой поток от внутреннего источника тепла в катоде. Q_{i-j} - потоки тепла через границы рассматриваемых слоев находятся по выписанным в работе [1] формулам, например: $Q_{\text{Э-Н}} = S_{\text{Э-Н}} \cdot \alpha_{\text{Э-Н}} (\hat{T}_{\text{Э}} - T_{\text{лик}}^{\text{Э}})$ - тепловой поток из электролита в настыль, $T_{\text{лик}}^{\text{Э}}$ - температура ликвидуса электролита; $Q_{\text{Э-М}} = S_{\text{Э-М}} \cdot \kappa_{\text{Э-М}} (\hat{T}_{\text{Э}} - \hat{T}_{\text{М}})$ - тепловой поток из электролита в металл и так далее.

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{\text{Г-ат}}, \alpha_{\text{дн-ат}}, \alpha_{\text{Э-Н}}, \alpha_{\text{М-Н}}$ считаются заданными, а коэффициенты теплопередачи $\kappa_{\text{кор-Г}}, \kappa_{\text{Э-М}}, \kappa_{\text{М-к}}, \kappa_{\text{к-дн}}$ вычисляются по выведенным нами формулам $\kappa_{i-j} = 2 / \left(\frac{\Delta_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta_j}{\lambda_j} \right)$, где Δ_i, λ_i - толщина и теплопроводность слоя.

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. Настыль контактирует непосредственно с электролитом или металлом, стальной кожух с окружающей средой.



Рис. 2. Схема бортовой стенки.

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 нестационарная задача:

$$\begin{aligned}
 c_2 M_2 \cdot \frac{d\hat{T}_2}{dt} &= Q_{3-2} - Q_{2-1}, \\
 c_3 M_3 \cdot \frac{d\hat{T}_3}{dt} &= Q_{4-3} - Q_{3-2}, \\
 c_4 M_4 \cdot \frac{d\hat{T}_4}{dt} &= Q_{5-4} - Q_{4-3} + Q_{\text{фаз}}^{\text{наст}}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{2-1} &= Q_{1-am}, \\
 Q_{1-am} &= \alpha_{1-am} (\hat{T}_1 - T_{am}) \cdot S_{1-am}, \\
 Q_{2-1} &= \kappa_{2-1} (\hat{T}_2 - \hat{T}_1) \cdot S_{2-1}, \quad Q_{3-2} = \kappa_{3-2} (\hat{T}_3 - \hat{T}_2) \cdot S_{3-2}, \\
 Q_{4-3} &= \kappa_{4-3} (\hat{T}_4 - \hat{T}_3) \cdot S_{4-3}, \quad Q_{5-4} = \alpha_{\text{э-н}} (\hat{T}_\text{э} - T_{\text{лик}}^\text{э}) \cdot S_{5-4}, \\
 Q_{\text{фаз}}^{\text{наст}} &= \rho_n L_n \frac{d\delta_4}{dt} \cdot S_{5-4}, \quad \kappa_{i-j} = 2 \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\delta_j}{\lambda_j} \right)^{-1}.
 \end{aligned}$$

Здесь \hat{T}_i - среднее значение температуры в i - ом слое, S_{i-j} - площади соответствующих границ слоев, $Q_{\text{фаз}}^{\text{наст}}$ - тепло фазового перехода, ρ_n - плотность настыли, L_n - скрытая теплота плавления настыли, M_i - массы соответствующих областей, δ_i и λ_i - толщины и теплопроводности слоев. Считаем $\frac{d\delta_4}{dt} \approx \frac{\delta_4^{n+1} - \delta_4^n}{\Delta t}$,

где δ_4^{n+1} - толщина настыли на $n+1$ шаге, δ_4^n - толщина настыли на предыдущем временном шаге.

С использованием условия фазового перехода получена формула для динамического расчета толщины настыли:

$$\begin{aligned}
 \delta_4^{n+1} &= 0.5 \left(\delta_4^n - \frac{\Delta t \cdot \alpha_{\text{э-н}} (\hat{T}_\text{э} - T_{\text{лик}}^\text{э})}{\rho_n L_n} \right) + \\
 &+ \sqrt{0.25 \left(\delta_4^n - \frac{\Delta t \cdot \alpha_{\text{э-н}} (\hat{T}_\text{э} - T_{\text{лик}}^\text{э})}{\rho_n L_n} \right)^2 + \frac{2\lambda_4 \Delta t}{\rho_n L_n} (T_{\text{лик}}^\text{э} - \hat{T}_4)}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Формулы (3) для определения толщин настывли в металле и электролите отражают связь массового и теплового баланса 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), выведена формула для расчета границы спекания анодной массы или коксо – пековой композиции (КПК):

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

Здесь Δz_1 - высота жидкого слоя анодной массы, т.н. высота КПК, T_{cn} - температура спекания КПК, \hat{T}_{a1} , \hat{T}_{a2} - температуры слоев анода, z_2 - высота спекенного анода (рис.1). Параметры “высота КПК” и “температура КПК” являются принципиальными для правильного формирования анода и определения расхода анодной массы, а также 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), (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 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:

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

Были использованы таблицы экспериментальных данных по времени растворения лабораторной навески глиноземов различных типов при различных свойствах электролита. Эти таблицы были аппроксимированы математическими зависимостями. Были учтены отличие 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 Δt определяется по формуле:

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

здесь t_0 - момент попадания порции глинозема в электролит, C_{∞} концентрация глинозема в электролите после полного растворения глинозема. Величины T и C_1 характеризуют скорость растворения глинозема. Согласно (4) определяется масса Δm_{al} растворившегося за время Δt глинозема.

Выполнены вычислительные эксперименты по оценке влияния увеличения напряжения электролизера на температуру и химический состав электролита, по определению криолитового отношения (КО), расчетам наружных и внутренних температур электролизера и химического состава электролита. Результаты расчетов согласуются с данными измерений.

Проведены расчеты результатов некоторых управляющих и случайных воздействий на технологические параметры и температуры областей электролизера с самообжигающимся анодом С8БМ. Рассмотрены следующие воздействия: увеличение силы тока; увеличение 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.

Рассмотрены результаты влияния изменения напряжения, изменения температуры окружающей среды и изменения уровня металла на переменные электролиза. Были также 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 мало увеличивает 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. 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 алюминиевой компании РУСАЛ. На рис. 4 представлена схема работы алгоритмов управления химическим составом на базе математической модели процесса.



Рис. 4. Схема алгоритмов программы управления составом электролита.

Блок 1 осуществляет запрос значений технологических переменных на момент измерения химического состава и формирует начальные условия. Блок 2 рассчитывает по представленной математической модели изменения переменных за период времени, прошедший после измерения химического состава. Измерения химического состава производятся 1-2 раза в неделю, расчет добавок сырья выполняется 1-3 раза в сутки. Блок 4 по рассчитанным блоком 2 на текущий момент значениям переменных выполняет расчет добавок сырья для поддержания заданного состава электролита. Расчет осуществляется оптимизационной процедурой, которая минимизирует отклонения прогнозируемого тренда изменения химического состава от заданных величин за счет выбора массы сырья и распределения его подачи во времени. Блок 5 сохраняет рассчитанные значения в базе данных, передает команды к отдаче сырья исполнительным механизмам на электролизере.

Этот новый метод управления позволил улучшить качество управления и экономить сырье [3].

Список литературы

- [1] Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В., Емельяшин М.В. Тепловая динамическая модель для управления технологией электролиза алюминия. Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева. 2006. Вып. 5 (12). С. 19-24.
- [2] A.I. Berezin, L.A. Isaeva, V.M. Belolipetsky, T.V. Piskazhova, V.V. Sinelnikov A model of Dissolution and Heating of Alumina Charged by Point-Feeding System in "Virtual Cell" program. Light Metals – 2005. – P.151-156.
- [3] Пискажова, Т.В. Методы эффективного управления технологическим процессом электролитического получения алюминия. Вестник Сибирского Федерального университета. Техника и технологии. – 2010. – Т.3, №2. – С. 159-170.