

УПРОЩЕННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ НАСТЫЛИ ВИРТУАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

В. М. БЕЛОЛИПЕЦКИЙ

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Красноярск, Россия

e-mail: belolip@icm.krasn.ru

Т. В. ПИСКАЖОВА

ООО “ИТЦ”, Красноярск, Россия

e-mail: piskajova@kraz.ru

An application of simplified mathematical models of virtual electrolytic cell incrustation dynamics in computer simulation of aluminium electrolysis process is presented.

Введение

Виртуальный электролизер (ВЭ) представляет собой компьютерную модель, имитирующую работу реального электролизера и предназначенную для использования в системе управления и для иллюстрации динамики процесса при обучении персонала. Компьютерная программа построена на модульном принципе. Разделение общей модели на модули (блоки) позволяет модифицировать отдельные модули, не изменяя другие блоки. Программа “Виртуальный электролизер” состоит из следующих блоков [1]:

1. Напряжение электролизера.
2. Ток, плотность тока, критическая плотность тока.
3. Загрузка, нагрев и растворение глинозема.
4. Нарботка металла, выход по току.
5. Динамика настыли.
6. Тепловой баланс ВЭ.
7. Массовый баланс.
8. Управляющие и технологические воздействия.

Настоящая работа посвящена двум модулям ВЭ: модели динамики настыли и модели теплового баланса в системе электролит — металл — окружающая среда. Предлагаются упрощенные постановки, позволяющие существенно сократить время расчетов. Упрощенные модели для схемы электролизера, представленной на рис. 1, строятся путем расщепления на одномерные задачи. Определение теплового баланса виртуального электролизера выполняется в три этапа:

Анод		Настыль (4)	Угольный блок (3)	Теплоизо- ляция (2)	Стальной кожух (1)	А т м о с ф е р а
Электролит (Э)						
Металл (М)	Настыль (4)	Угольный блок (3)	Теплоизо- ляция (2)	Стальной кожух (1)		
Дно						
Атмосфера						

Рис. 1. Упрощенная схема электролизера.

Этап 1. Определение динамики настыли в каждом (горизонтальном) слое.

Этап 2. Определение коэффициентов теплопередачи между слоями из решения одномерной (по вертикальной координате) задачи.

Этап 3. Решение уравнений теплового баланса для средних температур в двух областях — электролит и металл.

1. Модели динамики настыли в горизонтальных слоях

Квазистационарное приближение

Для схемы многослойной стенки и настыли (рис. 1) теплопередача описывается уравнениями теплопроводности [1, 2]:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad \lambda_i = \text{const.} \quad (1)$$

На границах раздела сред ставятся следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{атмосфера — стальной кожух } \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \alpha_a (T_1 - T_a); \\ \text{стальной кожух — теплоизоляция } T_1 = T_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}; \\ \text{теплоизоляция — угольный блок } T_2 = T_3, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}; \\ \text{угольный блок — настыль } T_3 = T_4, \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}; \\ \text{настыль — электролит } T_4 = T_{\text{лик}}, \quad \rho_n L_n \frac{d\delta_n}{dt} &= \lambda_4 \frac{\partial T}{\partial x} - \alpha_3 (T_3 - T_{\text{лик}}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь t — время; x — горизонтальная координата; T_i — температура соответствующего слоя стенки; ρ_i , c_i , λ_i — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности i -го слоя; T_a — температура воздуха, T_3 — температура электролита, T_m — температура металла, $T_{\text{лик}}$ — температура фазового перехода (плавления настыли); L_n — скрытая

теплота плавления настыли; $\alpha_{\text{э}}, \alpha_{\text{м}}, \alpha_{\text{а}}$ — коэффициенты теплопередачи; $\rho_{\text{н}}$ — плотность настыли; $\delta_{\text{н}}$ — толщина настыли.

Упрощенная модель основана на стационарном приближении [3]:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = 0, \quad T_i = T_i^0 + r_i(x - x_i^0), \quad i = \overline{1, 4}. \quad (3)$$

Произвольные постоянные T_i^0 , r_i определяются из граничных условий (2):

$$\begin{aligned} r_1 &= \alpha_{\text{а}}(T_1^0 - T_{\text{а}})/\lambda_1, \quad r_2 = \frac{\alpha_{\text{а}}}{\lambda_2}(T_1^0 - T_{\text{а}}), \quad r_3 = \frac{\lambda_2}{\lambda_3}r_2, \\ r_4 &= \frac{\lambda_3}{\lambda_4}r_3 = \frac{\alpha_{\text{а}}}{\lambda_4}(T_1^0 - T_{\text{а}}), \quad T_{\text{лик}} = T_4^0 + \delta_{\text{н}}\frac{\alpha_{\text{а}}}{\lambda_4}(T_1^0 - T_{\text{а}}), \\ T_4^0 &= T_1^0 + \lambda_1 r_1 \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right), \\ \rho_{\text{н}}L_{\text{н}}\frac{d\delta_{\text{н}}}{dt} &= \lambda_4 r_4 - \alpha_{\text{э}}(T_{\text{э}} - T_{\text{лик}}). \end{aligned} \quad (4)$$

Из соотношений (4) находятся связь температуры стального кожуха T_1^0 с температурой атмосферы

$$(T_1^0 - T_{\text{а}}) = \frac{k_{\text{э}}(T_{\text{лик}} - T_{\text{а}})}{\alpha_{\text{а}}}, \quad (5)$$

$$k_{\text{э}} = \left[\frac{1}{\alpha_{\text{а}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}}} \right]^{-1}$$

и уравнение для расчета толщины настыли

$$\rho_{\text{н}}L_{\text{н}}\frac{d\delta_{\text{н}}}{dt} = k_{\text{э}}(T_{\text{лик}} - T_{\text{а}}) - \alpha_{\text{э}}(T_{\text{э}} - T_{\text{лик}}). \quad (6)$$

Аналогичное уравнение получается для толщины настыли в слое настыль — металл:

$$\rho_{\text{н}}L_{\text{н}}\frac{d\delta_{\text{н}}^{\text{м}}}{dt} = k_{\text{м}}(T_{\text{лик}}^{\text{м}} - T_{\text{а}}) - \alpha_{\text{м}}(T_{\text{м}} - T_{\text{лик}}^{\text{м}}), \quad (7)$$

$$k_{\text{м}} = \left[\frac{1}{\alpha_{\text{а}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_{\text{н}}^{\text{м}}}{\lambda_{\text{н}}^{\text{м}}} \right]^{-1}.$$

Расчет толщины настыли в выделенных слоях проводится по соотношениям (6), (7). Здесь δ_i — толщина i -го слоя стенки ($i = 1, 2, 3$), $\delta_{\text{н}}, \delta_{\text{н}}^{\text{м}}$ — толщины настыли в соответствующем горизонтальном слое; $\lambda_{\text{н}}, \lambda_{\text{н}}^{\text{м}}, \lambda_i$ — коэффициенты теплопроводности соответствующего слоя; $T_{\text{а}}$ — температура окружающей среды, $T_{\text{э}}, T_{\text{м}}$ — средние температуры электролита и металла соответственно; $\alpha_{\text{э}}, \alpha_{\text{м}}, \alpha_{\text{а}}$ — коэффициенты теплоотдачи; $k_{\text{э}}, k_{\text{м}}$ — коэффициенты теплопередачи; $T_{\text{лик}}, T_{\text{лик}}^{\text{м}}$ — температуры фазового перехода; $\rho_{\text{н}}$ — плотность настыли; $L_{\text{н}}$ — скрытая теплота плавления настыли.

2. Упрощенная модель для определения коэффициентов теплопередачи между горизонтальными слоями

Для оценки коэффициентов теплопередачи между горизонтальными слоями рассматривается стационарная задача теплообмена в вертикальном направлении (по оси z). Используется стационарное приближение $T_i = a_i + b_i z$. На границах между слоями ставятся условия непрерывности температур и потоков тепла:

$$T_i = T_{i+1}, \quad \lambda_i \frac{dT_i}{dz} = \lambda_{i+1} \frac{dT_{i+1}}{dz}.$$

На границе анод — электролит считается известной температура $T_{\text{э}} = T_{\text{ан}}$. На границе с атмосферой задается условие

$$\lambda_{\text{дн}} \frac{dT_{\text{дн}}}{dz} = -\alpha_{\text{дн-а}}(T_{\text{дн}}^0 - T_{\text{а}}),$$

здесь индекс “дн” относится к параметрам дна.

Предполагается, что известны все коэффициенты теплопередачи, $T_{\text{лик}}$, $T_{\text{а}}$, поверхностная температура анода. Тогда из сформулированной задачи определяются все коэффициенты a_i , b_i . В частности, для $b_{\text{э}}$ получается формула

$$b_{\text{э}} = \frac{k}{\lambda_{\text{э}}}[T_{\text{а}} - T_{\text{ан}}],$$

где

$$k = \left[\frac{1}{\alpha_{\text{дн-а}}} + \frac{\Delta_{\text{э}}}{\lambda_{\text{э}}} + \frac{\Delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{\Delta_{\text{дн}}}{\lambda_{\text{дн}}} \right]^{-1},$$

$\Delta_{\text{э}}$, $\Delta_{\text{м}}$, $\Delta_{\text{дн}}$ — толщина слоя электролита, металла и дна соответственно.

Температура внешней поверхности дна $T_{\text{дн}}^0$ определяется по формуле

$$T_{\text{дн}}^0 = T_{\text{а}} - \frac{\lambda_{\text{э}}}{\alpha_{\text{дн-а}}} b_{\text{э}}.$$

Зная распределения температуры по вертикальной координате в каждом горизонтальном слое, можно вывести соотношение для потока тепла через горизонтальную границу электролит — металл:

$$Q_{\text{э-м}} = k_{\text{э-м}}(T_{\text{э}}^{\text{ср}} - T_{\text{м}}^{\text{ср}}),$$

где

$$k_{\text{э-м}} = 2 \left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{\lambda_{\text{э}}} + \frac{\Delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} \right)^{-1},$$

потери тепла через дно определяются по формуле

$$Q_{\text{м-дн}} = -\lambda_{\text{э}} b_{\text{э}}.$$

Соотношения для потоков тепла через горизонтальные границы используются в уравнениях теплового баланса для средних температур.

3. Уравнения теплового баланса для средних температур в выделенных слоях

Уравнения теплового баланса составляются для средних температур в областях Э, М (см. рис. 1) [1, 4]:

$$c_{\text{э}}M_{\text{э}}\frac{dT_{\text{э}}}{dt} = Q_1 + Q_{\text{ан}} - Q_{\text{э-н}} - Q_{\text{э-м}} - Q_{\text{г}} - Q_{\text{рг}},$$

$$c_{\text{м}}M_{\text{м}}\frac{dT_{\text{м}}}{dt} = Q_{\text{э-м}} - Q_{\text{м-н}} - Q_{\text{м-дн}}.$$

Здесь $T_{\text{э}}$, $T_{\text{м}}$ — средние температуры соответствующих слоев; Q_1 — приход тепла от электроэнергии; $Q_{\text{ан}}$ — теплообмен с анодом; $c_{\text{э}}$, $c_{\text{м}}$, $M_{\text{э}}$, $M_{\text{м}}$ — удельная теплоемкость, масса электролита и металла соответственно; $Q_{\text{э-н}}$, $Q_{\text{э-м}}$ — теплообмен через вертикальные границы электролит — настывль и металл — настывль соответственно; $Q_{\text{г}}$ — потери тепла на нагрев глинозема; $Q_{\text{рг}}$ — потери тепла на растворение глинозема.

Потоки тепла через вертикальные границы соответствующих слоев находятся по формулам

$$Q_{\text{э-н}} = \alpha_{\text{э}}(T_{\text{э}} - T_{\text{лик}}^{\text{э}})S_{\text{э-н}},$$

$$Q_{\text{э-м}} = \alpha_{\text{м}}(T_{\text{м}} - T_{\text{лик}}^{\text{м}})S_{\text{э-м}}.$$

Здесь $S_{\text{э-н}}$, $S_{\text{э-м}}$ — площади границ раздела настывли с электролитом и металлом. Верификация параметров модели ВЭ выполнялась с помощью натуральных данных.

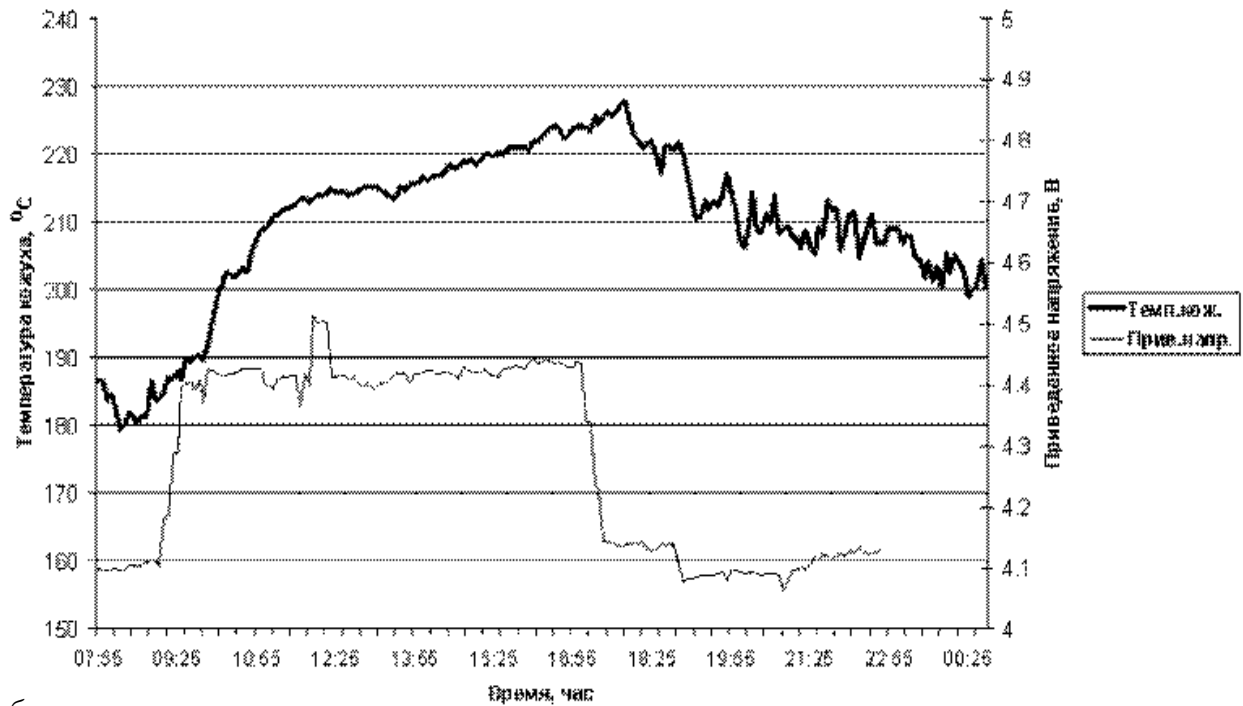
4. Примеры расчетов

В системах управления электролизерами в качестве переменной регулирования используется приведенное к номинальному току напряжение. Рассмотрим процесс изменения температур электролита, металла и кожуха при повышении приведенного напряжения. При повышении приведенного напряжения повышается температура электролита, что приводит к плавлению и увеличению теплоотдачи кожуха в окружающую среду. Повышается теплообмен между электролитом и металлом, увеличивается температура металла и уменьшается толщина настывли в зоне металла. Скорости плавления настывли в электролите и металле различные. При увеличении температур электролита и металла повышается температура ликвидуса (температура плавления настывли), замедляется процесс плавления настывли. В результате электролизер переходит в новое квазистационарное состояние с повышенными температурами электролита, металла, кожуха и уменьшенными толщинами настывли.

На рис. 2 представлены моделирование увеличения заданного напряжения на 0.3 В (рис. 2, б) и соответствующие экспериментальные данные (рис. 2, а). Как видно из рисунка, к моменту снятия добавки напряжения температура кожуха еще продолжала повышаться и в измерениях, и в расчетах. Диапазон изменения температур несколько различается — измеренная температура повышается на 30 градусов, рассчитанная на 20, но это может быть связано как с погрешностью измерений, так и необходимостью доработки модели. После уменьшения напряжения температура кожуха снижалась примерно с одинаковой скоростью и в измерениях, и в расчетах и к концу измеряемого (и соответственно, расчетного) периода оставалась повышенной.

а)

а) Измерения температуры кожуха в зоне электролита при увеличении напряжения



б)

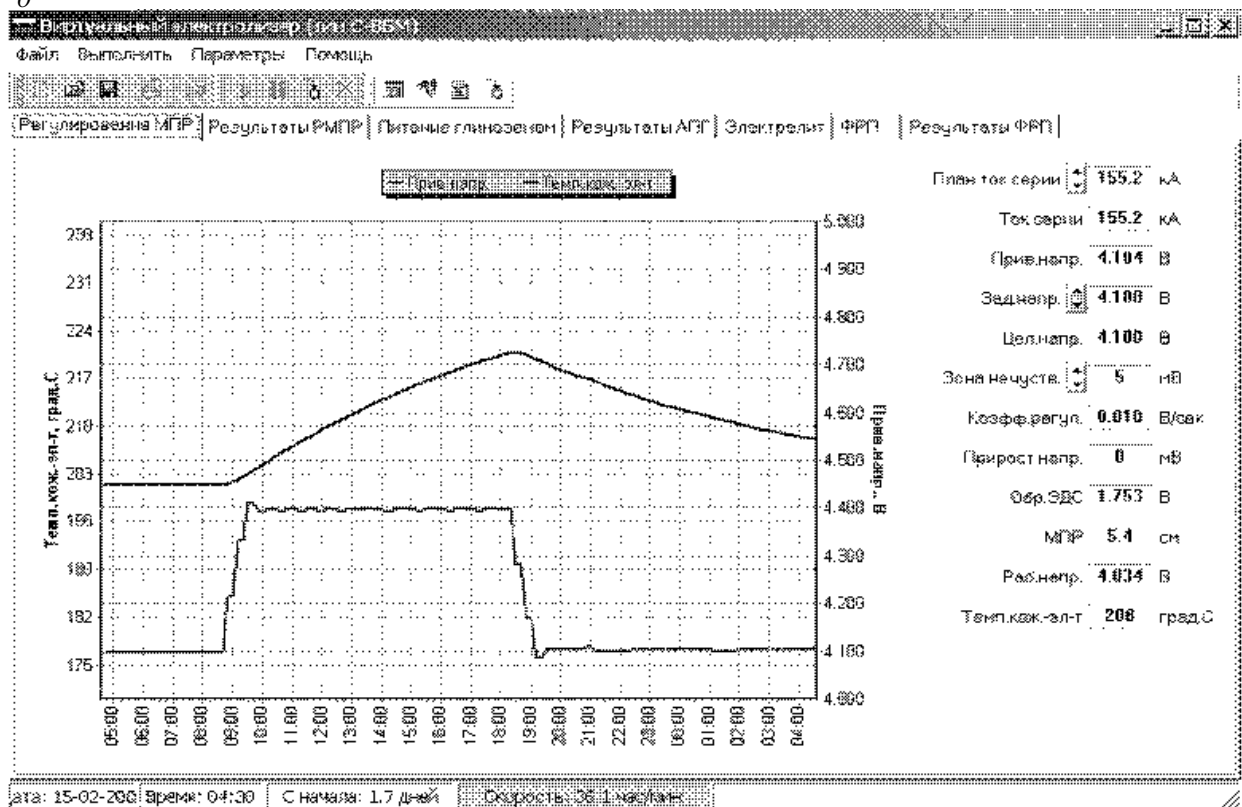


Рис. 2.

Использование упрощенной модели динамики настыли в виртуальном электролизере позволяет имитировать работу реального электролизера за минимальное расчетное время.

Возможна модификация предложенной методики на многослойную схему ВЭ, учитывающую толщину корки (настыли) в верхней части ванны, различные толщины настыли в верхней и нижней областях электролита и металла.

Список литературы

- [1] Манн В.Х., Никандров К.Ф., Пискажова Т.В., Юрков В.В. Модель процесса электролизера алюминия // Техничко-экономический вестник. 1999. № 13. С. 11–16.
- [2] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
- [3] ЧИСЛЕННОЕ моделирование задач гидроледотермики водотоков / В.М. Белоліпецкий, С.Н. Генова, В.Б. Туговиков, Ю.И. Шокин. Новосибирск: Институт вычислительных технологий, ВЦ в г. Красноярске, 1993. 138 с.
- [4] Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. Электрoметаллургия алюминия. Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.

*Поступила в редакцию 17 марта 2003 г.,
в переработанном виде — 21 мая 2003 г.*