

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

Панов Е.Н., Карвацкий А.Я., Васильченко Г.Н., Шилович И.Л., Билько В.В.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Украина, г. Киев, пр. Победы, 37, тел./факс (+38044) 2418609, e-mail: admin@rst.kiev.ua

При проектировании новых и модернизации действующих алюминиевых электролизеров большое значение имеют данные по их энергетическим балансам, позволяющие оценить как энергетическую эффективность ванн в целом, так и по отдельным статьям баланса и определить резервы для снижения удельного расхода электроэнергии. Классическая методика расчета энергобалансов электролизеров на температуру процесса и окружающей среды достаточно полно представлена в [1,2]. К основным недостаткам классической методики можно отнести: необходимость проведения экспериментов на действующих агрегатах и невозможность применения для вновь проектируемых электролизеров. Использование численного моделирования трехмерных физических полей в алюминиевых электролизерах, вместо выполнения натурального эксперимента, в сочетании с элементами классической методики позволяет избежать вышеуказанных недостатков и выполнять расчеты энергобалансов электролизеров на стадии их проектирования. При этом для расчета полей электрического потенциала и температуры предлагается использовать несвязанную постановку тепло-электрической ($U-T$) задачи [3]. Связь между решениями $U-T$ задач устанавливается по длине настыли под проекцией анодного массива.

Для решения несвязанной $U-T$ задачи используется программное обеспечение, основанное на методе граничных элементов, и представленное в [3,5]. При построении численных моделей в вычислительной среде [5] применяются файлы-заданий или макросы. Эти файлы специально разрабатываются для конкретной конструкции и типа задачи с использованием C-подобного языка программирования, который включает в себя соответствующие команды, операторы и функции. Файлы-заданий содержат информацию о геометрии модели, свойствам материалов, задание на расчет и т.д.

При разработке файла-задания для 3D модели U -поля $\frac{1}{4}$ алюминиевого электролизера ОА (рис. 1) использовалась постановка [3]. Удельное электрическое сопротивление ($УЭС$) материалов электролизера бралось или рассчитывалось из [6,7], а контактных электрических сопротивлений из [8]. Исходные данные и задание на расчет U -поля файла-задания включают в себя: геометрические характеристики электролизера, параметры формы рабочего пространства (ФРП), межполюсное расстояние (МПР), уровни металла и электролита; $УЭС$ электропроводных элементов конструкции электролизера и данные по значениям контактных электрических сопротивлений; задание на расчет поля электрического потенциала, электробаланса, распределения тока и его плотности по элементам конструкции.

Настройка численной модели проводится по экспериментальным данным (рабочему напряжению (u_p), падению напряжения в подине ($\Delta u_{под}$) и анодном массиве ($\Delta u_{ан}$) [4,9]) путем варьирования МПР, ФРП и значениями контактных электрических сопротивлений в пределах их погрешности определения.

При разработке файла-задания для 3D модели T -поля $\frac{1}{4}$ алюминиевого электролизера ОА (рис. 1) применялась постановка [3,5]. Теплопроводность материалов электролизера бралась по справочным данным [4,6]. Температура ликвидуса электролита рассчитывалась по составу электролита и температуре процесса с помощью зависимостей, приведенных в [10]. Исходные данные и задание на расчет T -поля файла-задания

включают в себя: геометрические характеристики электролизера, технологические параметры; данные расчета электробаланса; теплопроводность материалов; задание на расчет стационарного T -поля электролизера, параметров ФРП и температуры электролита пространства борт-анод, тепловых потерь и энергобаланса на температуру окружающей среды.

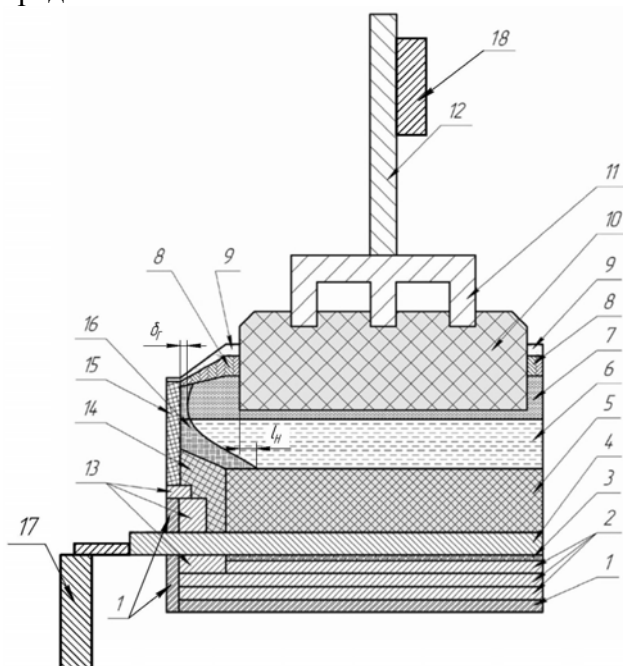


Рис. 1. Схема электролизера ОА

1 – теплоизоляция днища и борта;
2,3 – огнеупорный слой цоколя; 4 – блюмс; 5 – подовый блок; 6 – расплав алюминия; 7 – расплав электролита; 8 – корка; 9 – глинозем; 10-обожженный анод; 11 – анодная траверса с ниппелями; 12 – анодная штанга; 13 – бровка; 14 – периферийный шов; 15 – бортовой блок; 16 – настил и гарнизаж; 17,18 – катодная и анодная шины.

Адаптация численной модели проводится по экспериментальным данным (u_p , ФРП, МПР, температурам на поверхностях контакта с воздухом) путем изменения значений, МПР, теплопроводности материалов катодной футеровки с учетом их пропитки расплавами [4].

При решении несвязанной задачи входным параметром для расчета U -поля электролизера является длина настилы, а для расчета T -поля – падение напряжения в анодном узле и подине, омическое падение напряжения в электролите. Т.о. U, T -поля электролизера находятся методом последовательных приближений. Критерием сходимости при этом может быть длина настилы под проекцией анода или величина ее изменения, которая определяется из решения тепловой задачи.

После расчета U -поля электролизера (или омического падения напряжения – u_{\max}) определяется падение напряжения на отдельных его элементах как разность между средними значениями потенциалов соответствующих поверхностей: $\Delta u_{\text{под}}$ – разность потенциалов между поверхностью подины под металлом и торцами блюмсов; $\Delta u_{\text{ан}}$ – разность потенциалов между торцами анодных штанг и подошвами анодов; $\Delta u_{\text{ом МПР}}$ – разность потенциалов между подошвами анодов и зеркалом металла; падение напряжения в ошиновке электролизера, В

$$\Delta u_{\text{ош}} = u_{\max} - \Delta u_{\text{ан}} - \Delta u_{\text{ом МПР}} - \Delta u_{\text{под}}$$

Расчет падения напряжения в МПР от электрохимических реакций разложения Al_2O_3 происходит в несколько этапов. Сначала определяется производительность электролизера (M_{Al} , кг/с) при выходе по току $\eta_T = 100\%$

$$M_{\text{Al}} = \frac{\gamma \cdot I}{3600 \cdot 1000},$$

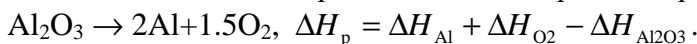
где $\gamma = 0,3354$ г/(А·ч) – электрохимический эквивалент получения алюминия; I – сила тока, А.

Далее определяется теплота сгорания анодов, выраженная в В

$$E_{\text{ст.ан}} = \frac{9300 \cdot M_{\text{CO}_2} + 8800 \cdot M_{\text{CO}}}{I},$$

где M_{CO_2} , M_{CO} – массовые расходы CO_2 и CO , кг/с.

Затем определяется энтальпия или тепловой эффект реакции (ΔH_p , кДж/моль) разложения глинозема на инертном аноде [2] при температуре электролиза



Далее энтальпия реакции преобразуется в напряжение

$$E_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \Delta H_p / (n \cdot F),$$

где n – число электронов, участвующих в реакции; $F = 96485,3$ Кл/моль – число Фарадея.

Тогда напряжение электрохимической реакции ($\Delta u_{\text{эл.хим}}$, В) при выходе по току 100% определяется как

$$\Delta u_{\text{эл.хим}} = E_{\text{Al}_2\text{O}_3} - E_{\text{ст.ан}}.$$

В результате получаем падение напряжения в электролите, В

$$\Delta u_{\text{эл}} = \Delta u_{\text{ом МПП}} + \Delta u_{\text{эл.хим}}.$$

При выходе по току < 100% часть $\Delta u_{\text{эл.хим}}$ переходит в омическое падение напряжения в электролите. В последнюю очередь рассчитывается рабочее напряжение на электролизере, В

$$u_p = \Delta u_{\text{ан}} + \Delta u_{\text{эл}} + \Delta u_{\text{под}} + \Delta u_{\text{ош}}$$

Для расчета распределения тока и плотности тока используется численное решение по элементам модели.

Первый этап методики расчета энергобаланса начинается с определения плотности внутренних источников теплоты на основании данных электробаланса. Внутренние источники в подине ($q_{\text{в под}}$, Вт/м³) и анодном массиве ($q_{\text{в ан}}$, Вт/м³) определяются из выражений

$$q_{\text{в под}} = \Delta u_{\text{под}} \cdot I / V_{\text{под}}, \quad q_{\text{в ан}} = \Delta u_{\text{ан}} \cdot I / V_{\text{ан}},$$

где $V_{\text{под}}$, $V_{\text{ан}}$ – объем подины и анодов, соответственно, м³.

Затем определяется падение напряжения в МПП ($\Delta u_{\text{МПП}}$, В), которое идет на теплотопери

$$\Delta u_{\text{МПП}} = \Delta u_{\text{ом МПП}} + \Delta u_{\text{аэ}} + \Delta u_{\text{эл.хим}} \cdot (1 - \eta_T / 100) - \Delta u_{\text{Al}} - \Delta u_{\text{ух.газ}}. \quad (1)$$

Рассмотрим определение всех слагаемых (1). Омическое падение напряжения в МПП берется из расчета электробаланса.

Падение напряжения от анодных эффектов (АЭ), В

$$\Delta u_{\text{аэ}} = (u_{\text{аэ}} - u_p) \cdot \nu_{\text{аэ}} \cdot \tau_{\text{аэ}} / 1440,$$

где $u_{\text{аэ}}$ – напряжение АЭ, В; $\nu_{\text{аэ}}$ – частота АЭ, шт./сут.; $\tau_{\text{аэ}}$ – длительность АЭ, мин.

Потери падения напряжения с вылитым алюминием с учетом выхода по току, В

$$\Delta u_{\text{Al}} = \frac{M_{\text{Al}} [1,04 \cdot (660 - t_{\text{в}}) + 400 + 1,18(t_{\text{эл}} - 660)] \cdot \eta_T}{I \cdot 100},$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха в корпусе, °С; $t_{\text{эл}}$ – температура электролита, °С.

Потери падения напряжения с уходящими газами с учетом выхода по току, В

$$\Delta u_{\text{ух.газ}} = \frac{M_{\text{CO}_2} \cdot 0,86 \cdot (t_{\text{ух}} - t_{\text{в}}) + M_{\text{CO}} \cdot 1,05 \cdot (t_{\text{ух}} - t_{\text{в}})}{I} \cdot \frac{\eta_T}{100},$$

где $t_{\text{ух}}$ – температура уходящих газов, °С.

Тогда внутренний источник в МПП ($q_{\text{в МПП}}$, Вт/м³) определяется как

$$q_{\text{в МПП}} = \Delta u_{\text{МПП}} \cdot I / V_{\text{МПП}},$$

где $V_{\text{МПП}}$ – объем электролита в межполюсном зазоре, м^3 .

Напряжение от сгорания анодов ($\Delta u_{\text{сг.ан}}$, В) с учетом выхода по току

$$\Delta u_{\text{сг.ан}} = \frac{9300 \cdot M_{\text{CO}_2} + 8800 \cdot M_{\text{CO}} \cdot \eta_{\text{T}}}{I} \cdot \frac{\eta_{\text{T}}}{100}.$$

Греющее напряжение на электролизере ($u_{\text{гр}}$, В)

$$u_{\text{гр}} = \Delta u_{\text{ом МПП}} + \Delta u_{\text{эл.хим}} + \Delta u_{\text{аз}} + \Delta u_{\text{ан}} + \Delta u_{\text{под}}.$$

Рабочее напряжение на электролизере, В

$$u_{\text{р}} = \Delta u_{\text{ом МПП}} + \Delta u_{\text{эл.хим}} + \Delta u_{\text{ан}} + \Delta u_{\text{под}} + \Delta u_{\text{ош}}.$$

Среднее напряжение на электролизере ($u_{\text{ср}}$, В)

$$u_{\text{ср}} = u_{\text{гр}} + \Delta u_{\text{ош.ср}},$$

где $\Delta u_{\text{ош.ср}}$ – падение напряжения в ошиновке серии, В.

Удельный расход электроэнергии ($w_{\text{уд}}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}_{\text{Al}}$)

$$w_{\text{уд}} = \frac{u_{\text{ср}}}{\gamma \cdot \frac{\eta_{\text{T}}}{100}} \times 1000.$$

На втором этапе выполняется расчет T -поля [5], ФРП и температуры электролита электролизера.

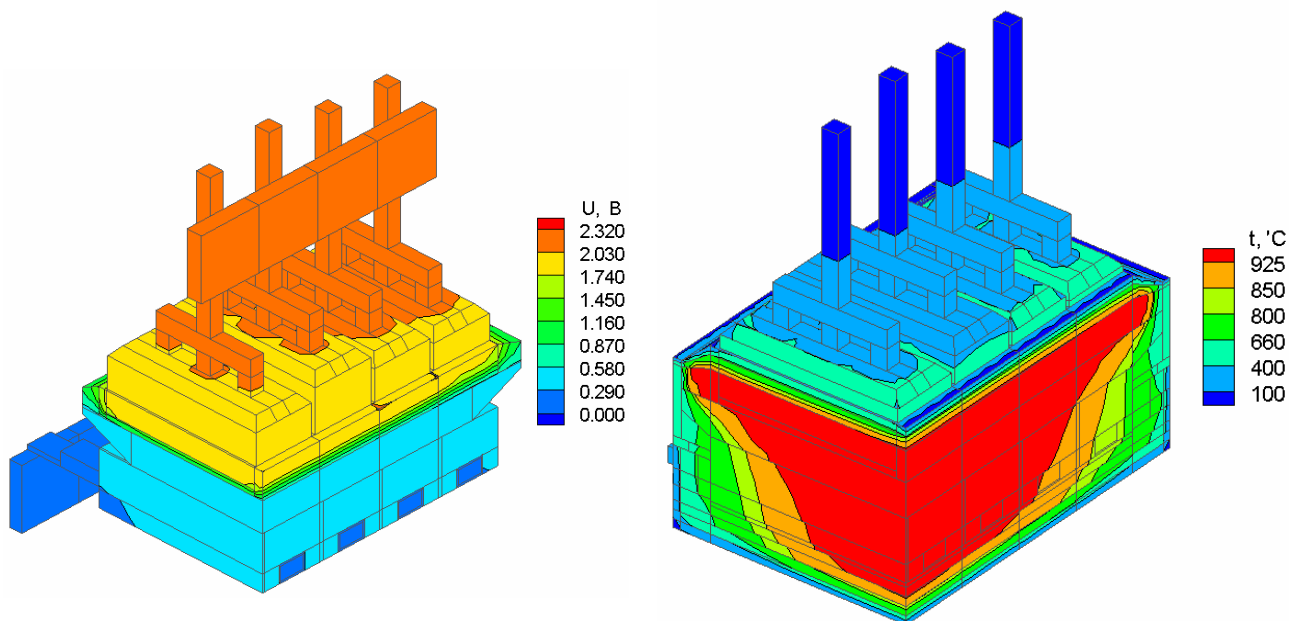
На третьем этапе производится расчет тепловых потерь – расходной статьи теплового баланса. При расчете теплотерь энергетический контур электролизера ограничивается со стороны катода блюмсами, а со стороны анодного массива – анодными штангами. Наружные поверхности катодного узла подразделяются на следующие зоны: днища; нижнего пояса – уровень до блюмсов; среднего пояса – уровень подового блока; верхнего пояса – уровень расплавов. Наружные поверхности анодного узла подразделяются на следующие зоны: глиноземной засыпки; анодов и ниппелей; анодных траверс и штанг. На отмеченных поверхностях зон рассчитываются средние значения температуры и тепловые потоки. Средняя температура ($t_{\text{ср}}$, $^{\circ}\text{C}$) на соответствующих наружных поверхностях элементов электролизера находится как среднеинтегральная величина.

Тепловые потоки (Q , кВт) на наружных поверхностях торцов блюмсов и анодных штанг в месте их контакта с анодной шиной находятся из решения по элементам модели, а на остальных наружных поверхностях электролизера - из узлового решения по закону Ньютона-Рихмана.

В приходные статьи баланса на температуру окружающей среды входят: теплота от сгорания угольного анода ($\Delta u_{\text{сг.ан}}$, В), ($\Delta u_{\text{сг.ан}} \cdot I$, кВт); теплота от подведенной электроэнергии ($u_{\text{гр}}$, В), ($u_{\text{гр}} \cdot I$, кВт).

В расходные статьи баланса на температуру окружающей среды входят: электрохимический процесс ($E_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \frac{\eta_{\text{T}}}{100}$, В), ($E_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \frac{\eta_{\text{T}}}{100} \cdot \frac{I}{1000}$, кВт); теплотери с вылитым металлом (Δu_{Al} , В), ($\Delta u_{\text{Al}} \cdot \frac{I}{1000}$, кВт); теплотери с уходящими газами ($\Delta u_{\text{ух.газ}}$, В), ($\Delta u_{\text{ух.газ}} \cdot \frac{I}{1000}$, кВт); теплотери анода и катода { ($\Delta u_{\text{МПП}} + \Delta u_{\text{ан}} + \Delta u_{\text{под}}$), В}, { ($\Delta u_{\text{МПП}} + \Delta u_{\text{ан}} + \Delta u_{\text{под}}$) $\cdot \frac{I}{1000}$, кВт}.

Результаты расчетов полей электрического потенциала и температур, электробаланса, теплотерь и энергобаланса на температуру окружающей среды алюминиевого электролизера ОА представлены на рис. 2 и табл. 1-3.



а) поле электрического потенциала (без учета падения напряжения на электрохимический процесс)

продольная сторона: торец: $t_{эл} = 928^{\circ}\text{C}$;

$t_{эл} = 929^{\circ}\text{C}$; $\delta_{Г} = 7,0\text{см}$; $\delta_{Г} = 15,6\text{см}$;

$\ell_{н} = -41,8\text{см}$. $\ell_{н} = -59,3\text{см}$.

$w_{уд} = 13990 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}_{\text{Al}}$.

б) поле температур

Рис. 2. Физические поля электролизера ОА-105

Таблица 1

Электробаланс электролизера ОА-105

Сила тока I , кА	Рабочее напряжение u_p , В	Падение напряжения в ошиновке эл-ра $\Delta u_{ош}$, В	Падение напряжения в анодном узле $\Delta u_{ан}$, В	Падение напряжения в подине $\Delta u_{под}$, В	Падение напряжения в электролите $\Delta u_{эл} = \Delta u_{ом \text{ МПР}} + \Delta u_{эл.хим}$
105,0	4,129	0,196	0,342	0,366	3,225 = 1,416 + 1,809

Представленная методика может быть применена для расчетов энергобалансов при проектировании алюминиевых электролизеров различных типов. Для расчета физических полей электролизеров возможно также применение коммерческого программного обеспечения [11].

Таблица 2

Теплопотери электролизера ОА-105

Наименование поверхности	Площадь поверхности, S м ²	Средняя температура, $t_{\text{ср}}$, °С	Теплопотери, Q , кВт
Днище	20,67	66,5	14,01
Нижний пояс	5,609	58,9	2,918
Средний пояс	5,814	131,7	9,835
Верхний пояс	10,072	375,8	64,54
Блюмсы	2,466	327,2	23,46
Итого катод:	44,63	–	114,76
Анодные штанги	10,63	84,4	3,86
Траверсы	11,10	203,9	29,79
Аноды	20,81	410,4	74,99
Глиноземная засыпка	8,799	98,9	7,77
Итого анод:	51,33	–	116,41
Итого катод+анод:	95,96	–	231,17

Таблица 3

Энергобаланс электролизера ОА-105

ПРИХОДНЫЕ СТАТЬИ	Мощность P , кВт	Δu , В	доля, %
Электроэнергия	420,1	4,001	79,98
Окисление анодов	105,2	1,002	20,02
Всего приход энергии	525,3	5,003	100,0
РАСХОДНЫЕ СТАТЬИ	P , кВт	Δu , В	доля, %
Электрохимический процесс	276,1	2,629	52,64
Теплопотери аноды и катод	231,2	2,202	44,07
Теплопотери с вылитым металлом	12,4	0,118	2,37
Теплопотери с уходящими газами	4,8	0,046	0,92
Всего расход энергии	524,5	4,995	100,0
Небаланс	0,84	0,008	0,159

Литература

1. *Криворученко В.В., Коробов М.А.* Тепловые и энергетические балансы электролизеров. М.: ГНТИ по черной и цветной металлургии, 1963. – 320с.
2. *Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н.* Электрометаллургия алюминия и магния. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1987. – 320с.
3. *Карвацкий А.Я., Дудников П.И., Лелека С.В., Билько В.В.* Численное исследование температурных и электрических полей в алюминиевых электролизерах //Промышленная теплотехника. –2003.-Т.25-приложение к №4.-С.389-391.
4. *Панов Е.Н., Васильченко Г.Н., Даниленко С.В., Карвацкий А.Я.* и др. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства/ Под общ.ред. Громова Б.С. - М.: Издательский дом “Руда и металлы”, 1998. – 256с.
5. *Карвацкий А.Я., Дудников П.И., Лелека С.В., Жученко А.И.* Застосування методу граничних елементів для розв'язання тривимірних задач теплопровідності// Наукові вісті НТУУ “КПІ”. –2005.-№5.-С.5-13.
6. Физические величины. Справочник/ Под ред. *И.С. Григорьева.* - М.: Энергоатомиздат, 1991. -1232с.

7. *G. Choudhary*, Electrical Conductivity for Aluminum Cell Electrolyte between 950 °C-1025 °C by Regression Equation, *J. Electrochem. Soc.* (1973), Vol.120, No.3, p. 381-383.
8. *Sorlie M., Oye H.A.* Cathodes in Aluminum Electrolysis. – 2nd ed. – Düsseldorf: Aluminium – Verlag, 1994.
9. *J.M.Jolas, J.Bos*, Cathode Drop Comparisons on Aluminium Peshiney Modern Cells, *Light Metals* 1994, p. 403-410.
10. *S. S. Lee, K.-S. Lei, P. Xu, J. J. Brown*, Determination of Melting Temperatures and Al₂O₃ Solubilities for Hall Cell Electrolyte Compositions, *Light Metals* 1984, p. 841-855.
11. *А.Б. Каплун, Е.М.Морозов, М.А.Олферова.* ANSYS в руках инженера. - М.:УРСС, 2003. -270с.