УДК 669.713

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГОБАЛАНСА АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

Карвацкий А.Я., Васильченко Г.Н., Билько В.В.

NUMERICAL SIMULATION APPLYING FOR ALUMINIUM ELECTROLYSER ENERGY BALANCE CALCULATION

National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”

Karvatsky A.Ya., Vasil’chenko G.N., Bil’ko V.V.

Введение

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 отдельных статей баланса и определить резервы для снижения УРЭ. 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 электролизерах и невозможность ее применения для проектируемых электролизеров. Использование численного моделирования трехмерных физических полей в алюминиевых электролизерах вместо выполнения натурного эксперимента в сочетании с элементами классической методики позволяет избежать вышеуказанных недостатков и выполнять расчеты энергобалансов электролизеров на стадии их проектирования.

Постановка задачи

Рассмотрим несвязанную постановку тепло-электрической задачи применительно к алюминиевому электролизеру (рис. 1). Поле электрического потенциала в электропроводных областях $\Omega \in R^3$ конструкции описывается стационарным уравнением электропроводности [3]

$$\nabla\left[\chi_i \nabla u(X)\right] = 0, \quad X \in \Omega. \qquad (1)$$

Граничные условия для (1) имеют вид:

– на торцах катодной и анодной ошиновок задается нулевой потенциал и плотность электрического тока, соответственно

$$u|_{\Gamma} = 0; \qquad (2)$$

$$\vec{n} \cdot [-\chi \nabla u] = j; \qquad (3)$$

– условия сопряжения различных элементов конструкции при наличии контактного электрического сопротивления

$$\begin{cases} \{u\} = r_e^+ \vec{n} \cdot \vec{j}^+ \\ \{\vec{n} \cdot \vec{j}\} = 0 \end{cases}; \qquad (4)$$

– на остальных поверхностях рассматривается условие отсутствия протекания электрического тока

$$\vec{n} \cdot \nabla u = 0. \qquad (5)$$

Поле температур алюминиевого электролизера (рис. 1) при его эксплуатации описывается нелинейным стационарным уравнением теплопроводности вида [3-5]

$$div[\lambda_i(t) \nabla t(X)] + q_{vi}(X) = 0, \quad X \in \Omega. \qquad (6)$$

В качестве граничных условий для (6) рассматриваются:

– на внешних границах электролизера, контактирующих с воздухом, записываются граничные условия конвективного типа, а на осях симметрии – адиабатные условия

$$\vec{n} \cdot [-\lambda_i(t) \nabla t] = \alpha_{эф}(t)(t - t_{в}); \qquad (7)$$

$$\vec{n} \cdot \nabla t = 0; \qquad (8)$$

– на границах контакта различных элементов конструкции электролизера – условия сопряжения, в которых может также учитываться контактное термическое сопротивление

$$\begin{cases} \{t\} = r_\lambda^+ \vec{n} \cdot \vec{q}^+ \\ \{\vec{n} \cdot \vec{q}\} = 0 \end{cases}. \qquad (9)$$

Запись (6) является обобщенной постановкой стационарной задачи типа Стефана, в которой учитывается скачек теплопроводности на границах электролит–гарнисаж и металл–настыль:

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_{т}, \ t \le t_1 \\ \lambda_{р}, \ t > t_1 \end{cases}. \qquad (10)$$

Связь между решениями задач (1)-(5) и (6)-(10) устанавливается по длине настыли под проекцией анодного массива итерационным способом.

Численные модели

Для решения сформулированных задач (1)-(5) и (6)-(10) используется программное обеспечение [3,5], основанное на ПМГЭ. 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 С-подобного языка программирования, который включает в себя соответствующие команды, операторы и функции. Файлы-заданий содержат информацию о геометрии модели, свойствам материалов, задании на расчет и т.д. При разработке файла-задания для 3D модели *U*-поля ¼ алюминиевого электролизера ОА-105 использовалась постановка (1)-(5) и методика расчета электробаланса. УЭС материалов электролизера брались из [6], а контактных электрических сопротивлений из [7]. Электропроводность электролита рассчитывалась по его химическому составу, КО и температуре процесса [8]. Исходные данные файла-задания для расчета *U*-поля включают в себя: геометрические характеристики электролизера, параметры ФРП, МПР, уровни металла и электролита; УЭС материалов конструкции электролизера и данные по значениям контактных электрических сопротивлений; задание на расчет *U*-поля и электробаланса. Адаптация или настройка численной модели проводится по экспериментальным данным ($u_{р}$, $\Delta u_{под,}$ $\Delta u_{ан}$ [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 ¼ алюминиевого электролизера ОА-105 применялась постановка (6)-(10) и методика расчета энергобаланса на температуру окружающей среды. Теплопроводность материалов электролизера бралась из [4,6], а температура ликвидуса электролита рассчитывалась по составу электролита, КО и температуре процесса [10]. Исходные данные файла-задания для расчета *T*–поля включают в себя: геометрические характеристики, технологические параметры, данные расчета электробаланса, теплопроводность материалов, температуру ликвидуса электролита, задание на расчет *T*–поля, параметров ФРП, температуры электролита, тепловых потерь и энергобаланса.

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

Методика расчета электробаланса

При решении несвязанной задачи входным параметром для расчета *U*-поля электролизера является длина настыли, 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 является либо длина настыли под проекцией анода, либо величина ее изменения, которая определяется из решения тепловой задачи.

После расчета *U*–поля электролизера [3] рассчитывается падение напряжения на отдельных его элементах. Вначале находится средний потенциал на соответствующих поверхностях элементов электролизера как среднеинтегральная величина. Затем рассчитываются падение напряжения в элементах конструкции электролизера как разность между средними значениями потенциалов соответствующих поверхностей: $\Delta u_{под}$, $\Delta u_{ан}$, $\Delta u_{ом\ МПР}$ и падение напряжения в ошиновке электролизера

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

Расчет падения напряжения в МПР от электрохимических реакций разложения Al_2O_3 происходит в несколько этапов. Сначала определяется производительность электролизера при выходе по току $\eta_т = 100\%$

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

Далее определяется теплота сгорания анодов, выраженная в В

$$E_{сг.ан} = \frac{9300 \cdot M_{CO2} + 8800 \cdot M_{CO}}{I}$$

Затем определяется энтальпия или тепловой эффект реакции разложения глинозема на инертном аноде [2] при температуре электролиза

$$Al_2O_3 \to 2Al + 1.5O_2,\ \ \Delta H_р = \Delta H_{Al} + \Delta H_{O2} - \Delta H_{Al2O3}.$$

Далее энтальпия реакции преобразуется в напряжение

$E_{\text{Al2O3}} = \Delta H_{\text{р}} / (n \cdot F)$.

Напряжение электрохимической реакции при выходе по току 100% определяется как

$\Delta u_{\text{эл.хим}} = E_{\text{Al2O3}} - E_{\text{сг.ан}}$.

Величина $\Delta u_{\text{эл.хим}}$ прибавляется к омическому падению напряжения в электролите. В результате получаем падение напряжения в электролите

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

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

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

С использованием численного решения по элементам рассчитываются следующие параметры тока в электролизере ОА: по торцам блюмсов и анодным ниппелям рассчитываются распределения результирующих значений $j_{\text{sum}}, I_{\text{sum}}$; по подошвам анодов рассчитываются распределения $j_{\text{x}}, I_{\text{x}}$; $j_{\text{y}}, I_{\text{y}}$; $j_{\text{z}}, I_{\text{z}}$; $j_{\text{sum}}, I_{\text{sum}}$. Также определяется суммарный ток через электролизер в различных сечениях (например, подошвы анодов, блюмсы, анодные ниппели).

Вышеописанная численная модель адаптирована для электролизера ОА с целью выполнения расчетов полей электрического потенциала при изменении длины подовой настыли, МПР, размеров катодных секций и их материалов, размеров бортовых блоков и т.д. При этом происходит расчет электробаланса электролизера, распределения тока и плотности тока на торцах анодных ниппелей, на подошвах анодов и на торцах блюмсов. Также рассчитываются значения горизонтальных составляющих тока и суммарный ток по элементам конструкции электролизера.

Методика расчета энергобаланса

На первом этапе выполняется расчет плотности внутренних источников теплоты по данным расчета электробаланса

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

Затем определяется падение напряжения в МПР, которое идет на теплопотери

$$\Delta u_{\text{МПР}} = \Delta u_{\text{ом МПР}} + \Delta u_{\text{аэ}} + \Delta u_{\text{эл.хим}} \cdot \left(1 - \eta_{\text{Т}} / 100\right) - \Delta u_{\text{Al}} - \Delta u_{\text{ух.газ}}. \qquad (11)$$

Слагаемые (11) включают в себя:

– омическое падение напряжения в МПР

$$\Delta u_{\text{ом МПР}} = \frac{1}{\chi} \frac{h_{\text{МПР}}}{f_{\text{ан.ф}} \cdot S_{\text{под.ан}}};$$

– падение напряжения от АЭ

$$\Delta u_{\text{аэ}} = \left(u_{\text{аэ}} - u_{\text{р}}\right) \cdot v_{\text{аэ}} \cdot \tau_{\text{аэ}} / 1440;$$

– потери падения напряжения с вылитым алюминием с учетом выхода по току

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

– потери падения напряжения с уходящими газами с учетом выхода по току

$$\Delta u_{\text{ух.газ}} = \frac{M_{\text{CO2}} \cdot 0{,}86 \cdot \left(t_{\text{ух}} - t_{\text{в}}\right) + M_{\text{CO}} \cdot 1{,}05 \cdot \left(t_{\text{ух}} - t_{\text{в}}\right)}{I} \cdot \frac{\eta_{\text{Т}}}{100}.$$

Тогда внутренний источник в МПР (в электролите) определяется как

$$q_{\text{v МПР}} = \Delta u_{\text{МПР}} \cdot I / V_{\text{МПР}}.$$

Напряжение от сгорания анодов с учетом выхода по току

$$\Delta u_{\text{сг.ан}} = \frac{9300 \cdot M_{\text{CO2}} + 8800 \cdot M_{\text{CO}}}{I} \cdot \frac{\eta_{\text{Т}}}{100}.$$

Греющее напряжения на электролизере

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

Рабочее напряжения на электролизере

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

Среднее напряжение на электролизере

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

Удельный расход электроэнергии

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

На втором этапе выполняется итерационный расчет *T*–поля [5], ФРП и температуры электролита электролизера. Критерием окончания расчета является выполнение условия

$$\left| t_i^{k+1} - t_i^k \right| \le \varepsilon_t, i = \overline{1, M}.$$

После расчета температурного поля определяются параметры ФРП и температура электролита в пространстве борт-анод по продольной и поперечной сторонам.

На третьем этапе выполняется расчет тепловых потерь. При расчете теплопотерь 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 тепловых потоков.

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 ($E_{\text{Al2O3}} \cdot \frac{\eta_{\text{Т}}}{100}$, В), ($E_{\text{Al2O3}} \cdot \frac{\eta_{\text{Т}}}{100} \cdot \frac{I}{1000}$, кВт); теплопотери с вылитым металлом (Δu_{Al}, В), ($\Delta u_{\text{Al}} \cdot \frac{I}{1000}$, кВт); теплопотери с уходящими газами ($\Delta u_{\text{ух.газ}}$, В), ($\Delta u_{\text{ух.газ}} \cdot \frac{I}{1000}$, кВт); теплотери анода и катода $\{\left(\Delta u_{\text{МПР}} + \Delta u_{\text{ан}} + \Delta u_{\text{под}}\right)$, В$\}$,

$\{\left(\Delta u_{\text{МПР}} + \Delta u_{\text{ан}} + \Delta u_{\text{под}}\right) \cdot \frac{I}{1000}$, кВт$\}$.

Результаты расчетов

Данные расчетов полей электрического потенциала и температур, электробаланса, теплопотерь и энергобаланса на температуру окружающей среды алюминиевого электролизера ОА на силу тока 105 кА представлены на рис. 2 и табл. 1-4.

Предложенная методика также применялась в расчетах энергобалансов электролизеров на различную силу тока от 70 до 320 кА.

Выводы

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

Литература

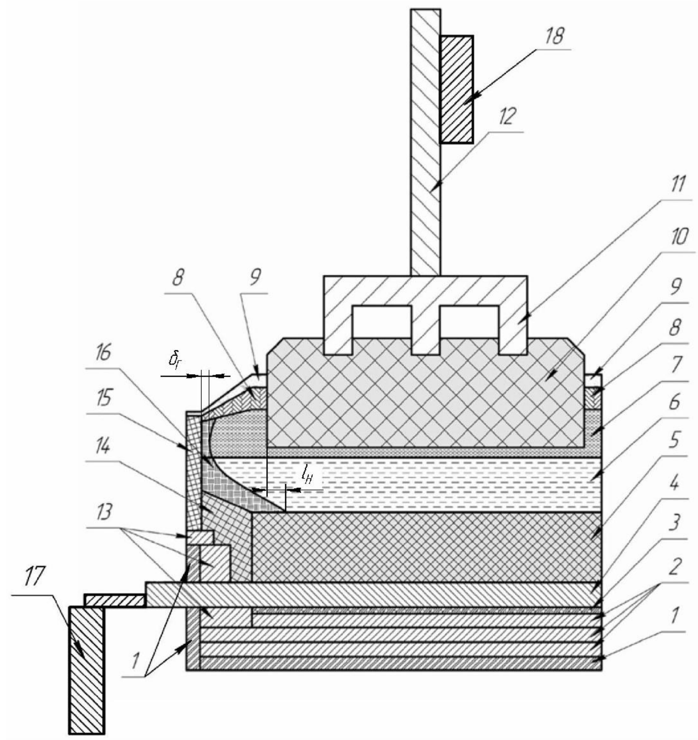
1. *Криворученко В.В., Коробов М.А.* Тепловые и энергетические балансы электролизеров. М.: ГНТИ по черной и цветной металлургии, 1963. – 320с.
2. *Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н.* Электрометаллургия алюминия и магния. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1987. – 320с.
3. *Карвацкий А.Я., 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. *Карвацький А.Я., Дудніков П.Й., Лелека С.В., Жученко А.І.* 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. Григорьва.*- М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232с.
7. *Sorlie M., Oye H.A.* Cathodes in Aluminum Electrolysis. – 2nd ed. – Düsseldorf: Aluminium – Verlag, 1994.
8. *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.

9. *J.M.Jolas, J.Bos*, Cathode Drop Comparisons on Aluminium Peshiney Modern Cells, Light Metals 1994, p. 403-410.

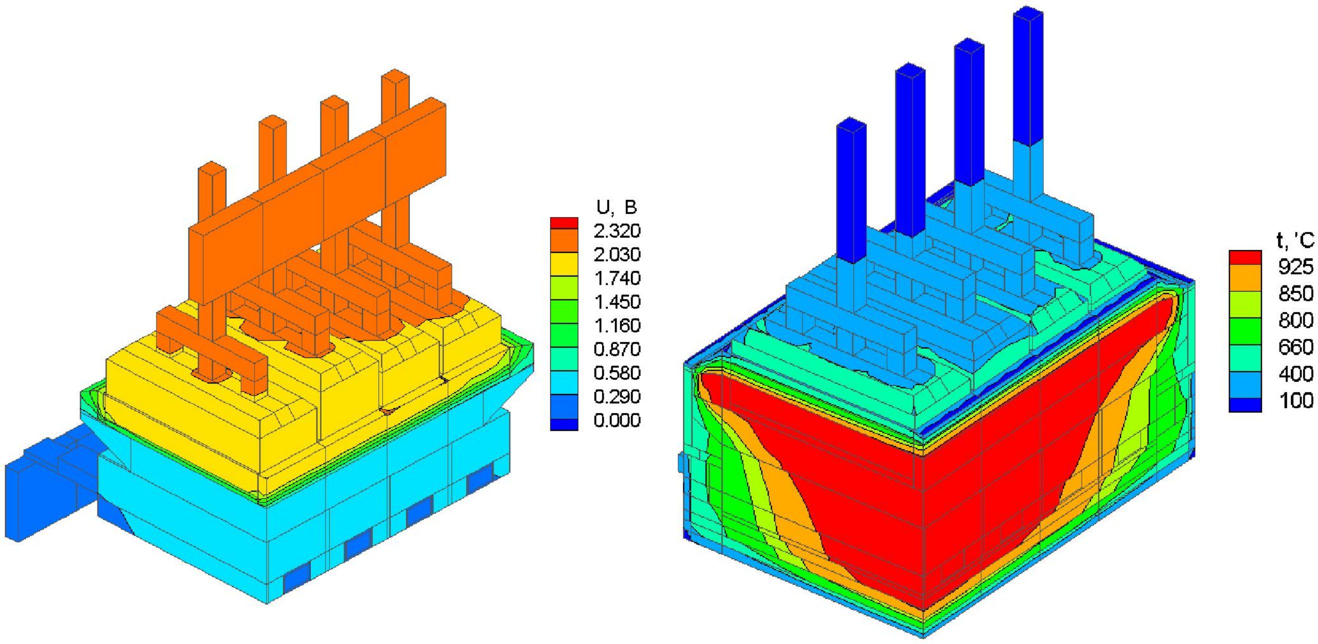
10. *S. S. Lee, K.-S. Lei, P. Xu, J. J. Brown*, Determination of Melting Temperatures and Al2O3 Solubilities for Hall Cell Electrolyte Compositions, Light Metals 1984, p. 841-855.

11. *А.Б. Каплун, Е.М.Морозов, М.А.Олферова.* ANSYS в руках инженера. - М.:УРСС, 2003. - 270с.

Авторы: Карвацкий А.Я. Васильченко Г.Н., Билько В.В.



18
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
8
9
16
15
14
13
17
1


U, B
2.320
2.030
1.740
1.450
1.160
0.870
0.580
0.290
0.000
t, 'C
925
850
800
660
400
100

а) б)

Под рисуночные подписи

1 – теплоизоляция днища и борта; 2,3 – огнеупорный слой цоколя; 4 – блюмс; 4 – 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 – настиль и гарнисаж; 17,18 – катодная и анодная шины.

Рис. 1. Схема электролизера ОА

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

продольная сторона: $t_{эл}$ =929°С; $\delta_г$ =7,0см; $l_н$ = –41,8см.

торец: $t_{эл}$ =928°С; $\delta_г$ = 15,6см; $l_н$ = –59,3см.

$w_{уд}$ =13990 кВт·ч/т$_{Al}$

б) поле температур

Рис. 2. Физические поля электролизера ОА-105

Таблица 1

Электробаланс электролизера ОА-105

Сила тока I, кА	Рабочее напряжение $u_р$, 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 $\Delta u_{эл}$ = $\Delta u_{ом\ МПР}+\Delta u_{эл.хим}$
105,0	4,129	0,196	0,342	0,366	3,225 = = 1,416 +1,809

Таблица 2

Распределение тока по блюмсам и анодам электролизера ОА-105
(отсчет номеров блюмсов - от центрального поперечного сечения (рис.2))

Номер	1	2	3	4
блюмса $j_{бл}$ / $I_{бл}$, А/см^2 / кА	27,23 / 7,203	25,50 / 6,746	24,33 / 6,435	22,13 / 5,853
анодной штанги $j_{шт}$ / $I_{шт}$, А/см^2 / кА	35,04 / 6,150	35,11 / 6,162	37,11 / 6,513	42,29 / 7,421
подошвы анода $j_{ан}$ / $I_{ан}$, А/см^2 / кА	0,656 / 5,277	0,663 / 5,336	0,689 / 5,549	0,708 / 5,696

Таблица 3

Теплопотери электролизера ОА-105

Наименование поверхности	Площадь поверхности, S м^2	Средняя температура, $t_{ср}$, °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 4

Энергобаланс электролизера ОА-105

ПРИХОДНЫЕ СТАТЬИ	***P*, кВт**	**Δ*u*, 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**	**Δ*u*, 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

Список условных обозначений

3D – трехмерная область (задача);

E_{Al2O3} – энтальпия реакции, выраженная в В;

$E_{\text{сг.ан}}$ – теплота сгорания анодов, выраженная в В;

F = 96485.309 Кл/моль – число Фарадея;

$f_{\text{ан.ф}}$ – коэффициент раскрытия анодов (или фактор увеличения площади подошвы анодов);

$h_{\text{МПР}}$ – толщина межполюсного зазора, м;

I – сила тока, протекающего через электролизер, А;

j, $\vec{j}$ – нормальная плотность и вектор плотности электрического тока, А/м^2;

$l_{\text{А}}$ – длина анода, м;

$l_{\text{н}}$ – длина настыли под проекцией анодов, см;

M_{Al} – производительность электролизера, кг/с

$M_{\text{CO2}}, M_{\text{CO}}$ – массовые расходы CO_2 и *CO*, кг/с;

n – число электронов участвующих в реакции;

$\vec{n}$ – внешняя нормаль к поверхности;

$\{\vec{n}\cdot\vec{q}\} = \vec{n}^{+}\cdot\vec{q}^{+} - \vec{n}^{-}\cdot\vec{q}^{-}$ – Ур. (9);

$\{\vec{n}\cdot\vec{j}\} = \vec{n}\cdot\vec{j}\big|_{\Gamma-} - \vec{n}\cdot\vec{j}\big|_{\Gamma+}$ – Ур. (4);

$n_{\text{А}}$ – количество анодов;

P – мощность, кВт;

Q – тепловой поток на наружных поверхностях электролизера, кВт;

$q_{vi} = \dfrac{\Delta u_i \cdot I}{V_i}$ – внутренний источник теплоты в *i*-м элементе конструкции электролизера, обусловленный протеканием электрического тока, Вт/м^3;

r_e – контактное электрическое сопротивление, Ом·м^2;

r_λ – контактное термическое сопротивление, (м²·К)/Вт;

$S_{под.ан} = n_А \cdot l_А \cdot w_А$ – площадь подошвы новых анодов электролизера, м²;

t – температура, °С;

$\{t\} = t^+ - t^-$ – Ур. (9);

t_1 – температура фазового перехода, °С;

$t_в$ – температура воздуха, °С;

$t_{ух} = \frac{t_{эл} + t_в}{2}$ - температура уходящих газов, °С;

$t_{эл}$ – температура электролита, °С;

u – электрический потенциал, В;

$\{u\} = u|_{Г+} - u|_{Г-}$ – Ур. (4);

$u_{аэ}$ – напряжение АЭ, В;

$u_{гр}$ – греющее напряжение на электролизере, В;

$u_р$ – рабочее напряжение на электролизере, В;

$u_{ср}$ – среднее напряжение на электролизере, В;

V_i – объем i-го элемента конструкции электролизера, м³;

$v_{аэ}$ – частота АЭ, шт./сут.;

$w_А$ – ширина анода, м;

$w_{уд}$ – удельный расход электроэнергии, кВт·ч/$т_{Al}$;

$X(x, y, z) \in \Omega$ – декартовы координаты, м;

$\alpha_{эф}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвективную и радиационную составляющие [4], Вт/(м²·К);

Г – граница области (подобласти) Ω;

γ = 0,3354 г/(А·ч) – электрохимический эквивалент получения алюминия;

$\Delta H_{р}$ – энтальпия или тепловой эффект реакции, кДж/моль;

Δu_{Al} – потери напряжения от вылитого алюминия, В;

$\Delta u_{аэ}$ – падение напряжения от анодных эффектов, В;

$\Delta u_{ан}$, $\Delta u_{под}$ – падение напряжения в анодном узле и подине, В;

$\Delta u_{ом\ МПР}$ – омическое падение напряжения в электролите, В;

$\Delta u_{ош}$ – падение напряжения в ошиновке электролизера, В;

$\Delta u_{ош.\ сер}$ – падение напряжения в ошиновке серии [1,2,4], В;

$\Delta u_{ух.газ}$ – потери напряжения с уходящими газами, В;

$\Delta u_{эл}$ – падение напряжения в электролите, В;

$\Delta u_{эл.хим}$ – напряжение электрохимической реакции при выходе по току 100%, В;

$\delta_{г}$ – минимальная толщина гарнисажа, см;

ε_{t} - погрешность расчета поля температур, °С;

$\eta_{т}$ – выход по току, %;

$\lambda_{i}(t)$ – температурная зависимость теплопроводности *i*-го элемента конструкции, Вт/(м·К);

ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

$\tau_{аэ}$ – длительность АЭ, мин.;

$\chi = 1/\rho$ – удельная электропроводность, $(Ом \cdot м)^{-1}$;

Ω – область (подобласть);

Индексы верхние:

“+” – справа от границы Г;

“– “– слева от границы Г;

k – номер итерации;

Индексы нижние:

i – номер области (элемента конструкции) Ур. (1), (7);

max – максимальное значение;

sum – суммарное значение;

р – жидкая фаза (расплав), рабочее значение, реакция;

т – твердая фаза;

Другие символы:

$\frac{\partial()}{\partial n}$ – нормальная производная;

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$ – оператор Гамильтона (“набла”);

Сокращенные названия:

T-поле – поле температур;

U-поле – поле электрического потенциала;

АЭ – анодный эффект;

КО – криолитовое отношение;

МПР – межполюсное расстояние;

ОА – обожженные аноды;

ПМГЭ – прямой метод граничных элементов;

УРЭ – удельный расход электроэнергии;

УЭС – удельное электрическое сопротивление;

ФРП – форма рабочего пространства.

Abstract

Aluminium electrolyser energy balance calculation method is proposed. The method includes both the elements of classical method energy balance calculation and physical parameters fields numerical simulation. Related to environment temperature energy balance calculation results are performed for aluminium electrolyser with burnt anodes.

Резюме

Предложена методика расчета энергобаланса алюминиевого электролизера, включающая в себя элементы классической методики совместно с численным моделированием физических полей. Представлены результаты расчетов энергобаланса на температуру окружающей среды алюминиевого электролизера с обожженными анодами.

Резюме

Запропонована методика розрахунку енергобалансу алюмінієвого електролізеру, яка включає в себе елементи класичної методики спільно з чисельним моделюванням фізичних полів. Представлені результати розрахунків енергобалансу на температуру довкілля алюмінієвого електролізеру з обпаленими анодами.