

ОБ УСТРАНЕНИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КРИТЕРИЯ БОЯРЕВИЧА-РОМЕРИО

Савенкова Н. П., Анпилов С. В., Проворова О. Г.,
Кузьмин Р. Н.

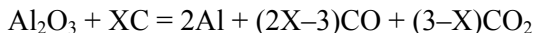
(Россия, Москва, Красноярск)

В настоящей работе предлагается алгоритм выбора ведущих пар мод критерия Бояревича-Ромерио, позволяющего определить критическое МПР промышленного электролизера.

Рассматриваемый метод основан на адекватном математическом моделировании полной физической постановки задачи МГД-нестабильности промышленного электролизера.

Математическая постановка базируется на осредненных по высоте уравнениях Навье-Стокса и системе уравнений Максвелла.

Введение. В настоящее время используется электролитический способ производства алюминия. Суммарная реакция, происходящая в электролизере может быть представлена в виде уравнения:



То есть в процессе электролиза в основном расходуется глинозем и углерод (в смеси песка и кокса), а также электроэнергия на разложение глинозема и поддержание рабочей температуры, дополнительно расходуются фтористые соли.

Упрощенно модель алюминиевого электролизера с обожженными анодами представляет собой прямоугольный бак. В нем в два ряда расположены аноды. Вертикальный ток течет от угольных анодных блоков (частично погруженных в электролит) через слой электролита (где в результате электролиза выделяется алюминий) и слой жидкого алюминия до угольного катода. Вдоль

бортов электролизера находится застывший слой электролита – настыль. Она служит защитой от коррозии внутренней поверхности ванны электролитом. В технологическом процессе получения алюминия большое значение имеет оптимизация работы электролизёра для повышения устойчивости процесса и максимизации выхода металла.

Основным показателем работы электролизёра является выход по току. Выход по току - отношение между практическим и теоретическим производством алюминия. Считается, что первопричина снижения выхода по току - окисление растворенного алюминия анодным газом (CO_2). Для уменьшения энергетических потерь нужно слой электролита по возможности уменьшать, но при этом на поверхности раздела металл-электролит могут возникнуть колебания. При некоторых условиях наблюдается рост амплитуд этих волн, который называется неустойчивостью или магнитогидродинамической (МГД) нестабильностью. Даже простое незатухающее колебание поверхности раздела должно быть устранено, так как при нем возрастает массоперенос растворенного алюминия от катода в активную зону расплава электролизера, где он снова окисляется. МГД-неустойчивость является основным препятствием увеличения выхода по току.

Важным параметром, влияющим на эффективность работы электролизера, является межполюсное расстояние (МПР). МПР – это расстояние между подошвой анодов и поверхностью металла. Чем больше межполюсное расстояние, тем больше выход по току. Однако, если межполюсное расстояние больше 6 см, то выход по току растет незначительно. А если межполюсное расстояние меньше 3 см, то выход по току резко падает, так как алюминий попадает в реакционную зону, где происходит его обратное окисление. Поэтому для большинства ванн оптимальное МПР лежит в диапазоне 4–6 см.

Одна из основных задач текущей технологии – создание условий в межполюсном пространстве, при которых уменьшается поток растворенного и диспергированного алюминия с поверхности катода и снижается вероятность его вторичного окисления, а

также создание условий, при которых уменьшается вероятность зажатия ванны, когда МПР становится меньше допустимого.

Модель. Предложена нестационарная математическая модель для описания полной физической постановки процесса электролиза в промышленной ванне: физических полей, электромагнитных полей и поверхности раздела жидкий металл – электролит с учетом геометрии ванны и распределения тока по анодам.

В качестве исходных уравнений, моделирующих процессы в электролизной ванне, рассматривается классическая система уравнений магнитной гидродинамики в переменных Эйлера. Процессы в электролизёре протекают медленно по вертикальной координате по сравнению с горизонтальными направлениями, кроме того, вертикальные линейные размеры электролизной ванны на порядок меньше горизонтальных (расстояние от верхней границы электролита до дна ванны порядка 40 сантиметров, в то время как длина ванны около 9 метров).

На основании этого допущения производится интегрирование системы по вертикальной координате, в результате которого происходит переход к значениям основных физических величин в средних слоях жидкого металла и электролита, однако, сохраняется информация о распределении высоты слоев обеих этих сред (см. [1]).

Уточнение критерия. Для прогноза устойчивости процессов, протекающих в электролизере, иногда выводят упрощенные (по сравнению с приводимыми в [1]) уравнения, из которых выводятся так называемые критерии устойчивости. Эти критерии связывают параметры, характеризующие процесс, и позволяют ответить на вопрос, будет ли электролизер работать устойчиво, т.е. не будет ли МПР меньше, чем МПР критическое для данного электролизера. В качестве критерия для определения порога устойчивости электролизера в производственных АСУТП часто используется критерий Бояревича-Ромерио (см [2]), заключающийся в решении следующего неравенства в режиме реального времени:

$$\begin{aligned}
 & (\rho_m - \rho_3)^2 g^2 \pi^4 h_m^2 h_{МПП}^2 \left(\frac{m'^2}{L_x^2} + \frac{n'^2}{L_y^2} \right) \left(\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2} \right) \\
 & \left(\frac{m'^2 - m^2}{L_x^2} + \frac{n'^2 - n^2}{L_y^2} \right)^2 \geq \frac{I_c^2}{4 \cdot L_x^2 L_y^2} \varepsilon_k^2 \varepsilon_{k'}^2 \\
 & \left[\frac{n' m - n m'}{L_x L_y} \left(B_{k'_x + k_x, k'_y + k_y} - B_{k'_x - k_x, k'_y - k_y} \right) + \right. \\
 & \left. \frac{n' m + n m'}{L_x L_y} \left(B_{k'_x + k_x, k'_y - k_y} - B_{k'_x - k_x, k'_y + k_y} \right) \right]^2
 \end{aligned}$$

где $k_x = \frac{\pi}{L_x} m$, $k_y = \frac{\pi}{L_y} n$, m, n – целые числа,

$$\varepsilon_k = \begin{cases} 1, & \text{если } k_x, k_y \neq 0 \\ 1/\sqrt{2}, & \text{если } k_x \text{ или } k_y = 0, \quad k_x \neq k_y, \\ 1/2, & \text{если } k_x = k_y = 0 \end{cases}$$

а I_c – ток серии, при котором рассчитывалось магнитное поле.

В критерии учитываются основные технологические параметры и распределение вертикальной компоненты магнитного поля через ее преобразование Фурье:

$$B_{k_x, k_y} = \frac{4}{L_x L_y} \int_{\Gamma} B_z \sin k_x x \sin k_y y dx dy$$

Критическое значение МПП по этому критерию может быть выражено через

$$h_{\text{МПП}} = A \frac{I_c^2}{(\rho_m - \rho_3) h_m}, \text{ где}$$

$$A = \frac{\varepsilon_k \varepsilon_{k'}}{2 \cdot L_x L_y I_0} \left[\frac{n'm - nm'}{L_x L_y} (I(m'+m, n'+n) - I(m'-m, n'-n)) + \right. \\ \left. + \frac{n'm + nm'}{L_x L_y} (I(m'+m, n'-n) - I(m'-m, n'+n)) \right] / \\ \left[g \pi^2 \sqrt{\left(\frac{m'^2}{L_x^2} + \frac{n'^2}{L_y^2} \right) \left(\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2} \right) \left(\frac{m'^2 - m^2}{L_x^2} + \frac{n'^2 - n^2}{L_y^2} \right)} \right]$$

Здесь Фурье-компоненты вертикальной составляющей магнитного поля в зависимости от длины настыли обозначены через:

$$I(m, n) = \frac{4}{L_x L_y \Gamma} \int B_z \sin k_x x \sin k_y y dx dy.$$

При использовании на практике существует неопределенность в выборе ведущей пары мод $(m, n) - (m', n')$, которая используется в критерии устойчивости, т.к. заранее неизвестна пара, наиболее характерная для данной ванны.

Предложенная математическая модель позволяет устранить эту неопределенность. Проводится расчет динамики поверхности раздела при стабильном режиме работы для конкретных электролизных ванн. Из минимального значения распределения МПП во времени вычисляется далее критическое расчетное значение МПП по формуле $h_{\text{кр}} = 0.7 h_{\text{мин}}$. На

Рис. 2 представлены расчеты динамики МПП. Рассчитанное нами МПП лежит в диапазоне 3,7–5,6 см. Отвечающее ему критическое МПП должно быть примерно равно $0,7 * 3,7 = 2,59$ см.

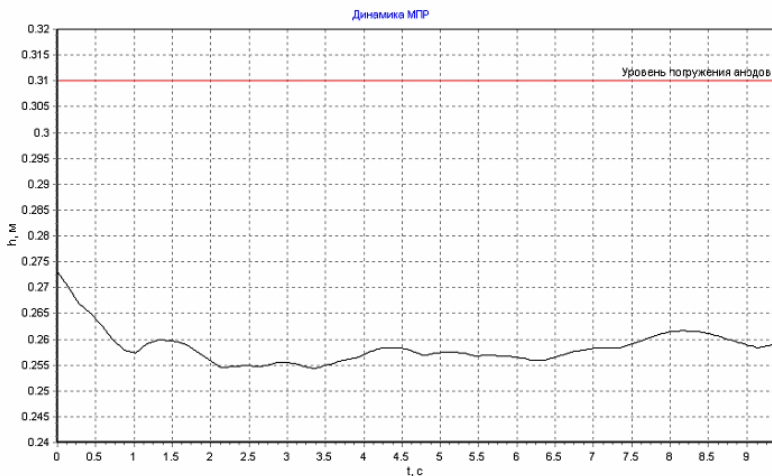


Рис. 2. Динамика МПР

Далее по таблице, в которой представлены МПР для различных ведущих пар мод, вычисленных по критерию Ромерио-Бояревича, ищется пару, которой соответствует МПР наиболее близкий к $h_{кр}$, рассчитанному нами.

Предлагается следующий алгоритм снятия неопределенности выбора пары мод в критерии:

- Построение графика зависимости МПР от времени.
- Нахождение минимального МПР и вычисление $h_{кр} = 0.7h_{мин}$.
- Сравнение $h_{кр}$ с таблицей, в которой для различных пар мод $(m,n)-(m',n')$ рассчитано $h_{МПР}$ по критерию Бояревича-Ромерио.
- Выбор одной пары мод, которая в дальнейшем будет использоваться в критерии.

Из таблицы 1 видно, что наиболее близкое, рассчитанное нами $h_{кр} = 2,59$ см, отвечает паре мод $(1,1)-(2,0)$, для которой $h_{МПР} = 2,52$ см. Таким образом, для данного электролизера в критерии Бояревича-Ромерио рекомендуется выбрать пару мод $(1,1)-(2,0)$.

В заключение отметим, что сравнение с экспериментальными данными подтвердило правильность рекомендованого выбора мод.

Таблица 1. Рассчитанное по критерию Бояревича-Ромерио критическое МПР, соответствующее различным ведущим парам мод.

| m | n | m' | n' | h _{МПР} , см |
|---|---|----|----|-----------------------|
| 1 | 2 | 5 | 0 | 5.90 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 3.38 |
| 2 | 1 | 3 | 0 | 3.35 |
| 1 | 2 | 4 | 1 | 3.02 |
| 1 | 1 | 2 | 0 | 2.52 |
| 0 | 1 | 3 | 0 | 2.21 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алаторцев А.В., Кузьмин Р.Н., Савенкова Н.П., Проворова О.Г. Динамическая модель магнито-гидродинамических процессов в алюминиевом электролизере.// Прикладная Физика. 2004. №5 с. 33-42
2. Бояревич В.В., Математическая модель для расчета параметров алюминиевого электролизера. –1987. - №1. – стр 107-115

SOLVING ROMERIO-BOYAREVICH CRITERIA UNCERTAINTY

Savenkova N. P., Anpilov S. V., Provorova O. G., Kuzmin R. N.

(Russia, Moscow, Krasnojarsk)

Current work represents choosing the leading pair of modes for Romerio-Boyarevitch criteria algorithm that makes possible to estimate the minimal ACD (anode-to-cathode distance).

Method relies on sufficient math modeling of full physical problem definition of MHD instabilities in reduction cell.

Setting of the problem is based on averaged by height Navier-Stokes equations and Maxwell set of equations.