

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА В АЛЮМИНИЕВОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ ПРИ ЗАМЕНЕ АНОДА

Алаторцев А. В., Кузьмин Р. Н., Савенкова Н. П.

(Россия, Москва)

Технология процесса электролиза с обожженными анодами подразумевает периодическую замену анодов, в процессе чего могут происходить нежелательные возмущения среды, приводящие к снижению эффективности производства, вплоть до остановки электролизера. Предлагается дальнейшее развитие динамической модели МГД-процессов в алюминиевом электролизере [1, 2], позволяющее моделировать процесс замены анодов. Проводится исследование устойчивости работы электролизера при различных схемах замены анодов.

Развитие алюминиевой промышленности идет, в частности, путем модификации существующего производства и внедрения новых технологий. Основным показателем работы электролизера является выход по току. Выход по току – это отношение количества практически полученного алюминия к количеству, которое должно выделиться на катоде согласно закону Фарадея. В процессе производства алюминия возникают нежелательные явления (перекос, циркуляция металла, волнообразование на поверхности металла и др.), что ведет к негативным последствиям: к размыву настелей, разрушению подовых и анодных блоков, прорыву металла, перемешиванию алюминия с электролитом и пр. В результате нарушается технологический режим, снижается выход по току и уменьшается срок службы электролизеров. Важно знать, как изменения конструкции и технологических параметров отражаются на процессах, происходящих в электролизере.

Существуют 2 технологии производства первичного алюминия: в электролизерах с предварительно обожженными анодами и в электролизерах с самообжигающимися анодами. В настоящее время наиболее распространенными в мире являются электролизеры с обожженными анодами (на них приходится 70% количества добываемого алюминия), так как они являются более эффективными.

Алюминий добывается путем электролиза криолитоглиноземного расплава в электролизной ванне. Основными компонентами криолитоглиноземного расплава являются: криолит Na_3AlF_6 , фтористый алюминий AlF_3 и глинозем Al_2O_3 . В промышленном электролите всегда присутствует фтористый кальций – CaF_2 , который снижает температуру плавления и снижает потери алюминия.

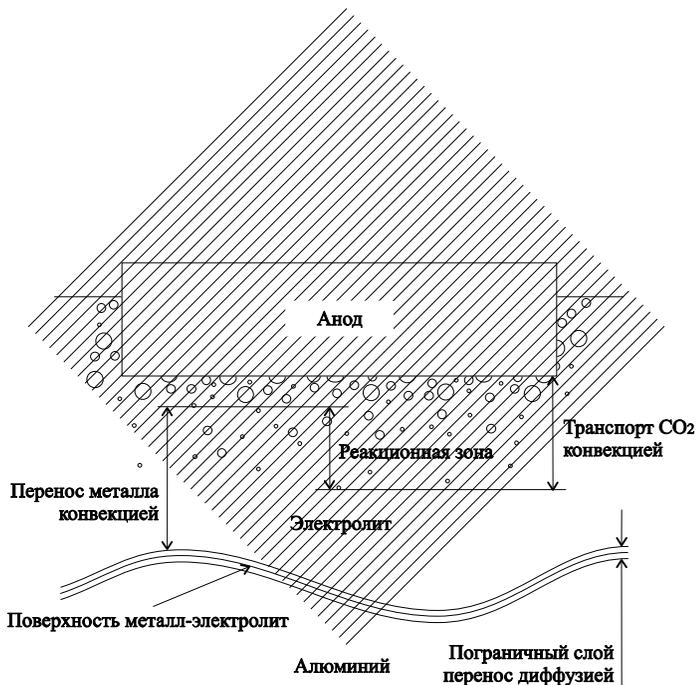
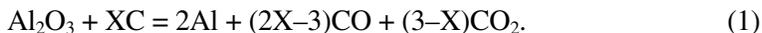


Рис.1. Рабочая зона межполюсного зазора электролизера

Электролит в расплавленном состоянии диссоциирует на ионы. Положительно заряженные ионы (катионы) разряжаются на катоде, отрицательные ионы (анионы) – на угольном аноде.

Основной процесс на катоде – восстановление трехвалентного алюминия $Al + 3e = Al$, на угольном аноде происходит разряд кислородосодержащих ионов с образованием окислов углерода CO и CO_2 .

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.

Процесс электролиза непрерывный, поэтому в электролит периодически загружают глинозем (а в самообжигающийся анод – анодную массу). Для поддержания уровня и состава электролита загружают свежий и вторичный криолит, обратный электролит, фтористый алюминий и кальцинированную соду.

Упрощенно модель алюминиевого электролизера с обожженными анодами представляет собой прямоугольный бак. 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. Слои электролита и металла не перемешиваются. Вдоль бортов электролизера находится застывший слой электролита – настель. 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 количества практически полу-

ченного алюминия к количеству, которое должно выделиться на катоде согласно закону Фарадея:

$$\eta = \frac{P}{I \cdot t \cdot 0,335} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Известно, что увеличение выхода по току на 1% на БРАЗ (Братском Алюминиевом Заводе), производящем 920000 тонн алюминия в год, дает увеличение выхода металла на 10000 т. в год.

Считается, что первопричина снижения выхода по току – окисление растворенного алюминия анодным газом (CO_2). Основная реакция, вызывающая потери металла:



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 межполюсное расстояние (МПР), где он снова окисляется. МГД-неустойчивость является основным препятствием увеличения выхода по току.

При замене выгоревших анодов, которые выводят по 1–2 шт. по мере их выгорания, происходит перераспределение токов (суммарная величина которых примерно равна 260 Ка) по анодам, что влечет за собой изменение распределения токов в металле и электролите, а значит, ведет к изменению величины электромагнитной силы, действующей в этих средах. Это, в свою очередь, вызывает изменение распределения скоростей в электролите и металле, образование вихрей в средах, что вызывает возмущение границы раздела сред металла и электролита. Часто при этом возникает МГД-неустойчивость, зазор между анодом и катодом становится меньше допустимого, $\approx 3\text{см}$.

Известно, что с ростом температуры плотность алюминия падает меньше, чем плотность криолита, в итоге уже при 950 градусах по Цельсию плотность алюминия больше плотности криолита на 10%. Поэтому выделяющийся в результате электролиза алюминий осаждается на падине ванны под электролитом.

Если температура меньше 950 градусов по Цельсию, то электролит может кристаллизоваться, и плотность алюминия станет меньше плотности криолита, и металл всплывет на поверхность. Чем выше электропроводность электролита, тем меньше падение напряжения при прохождении через него тока, т.е. затраты электроэнергии будут меньше. Максимальная электропроводность электролита равна 4.46 мо/см при температуре 1000 градусов по Цельсию. Если в электролит добавить фтористый натрий и фтористый алюминий, то его проводимость будет почти в 2 раза меньше (2.67мо/см), т.е. затраты энергии возрастут.

На выход по току влияет (при электролизе криолит-глиноземных расплавов):

- 1) температура электролита;
- 2) межполюсное расстояние;
- 3) плотность тока;
- 4) состав электролита;
- 5) качество обслуживания ванны.

Важным показателем является температура электролита: повышение температуры на каждые 10 градусов по Цельсию понижает выход по току на 3–4%. При температуре, равной 940 градусов по Цельсию, выход по току равняется 95%, при температуре, равной 980 градусов по Цельсию, выход по току равен 74%. Поэтому надо поддерживать температуру равной 940 – 970 градусов по Цельсию.

Межполюсное расстояние – расстояние между поверхностью анода и зеркалом алюминия на катоде – второе по важности.

Чем больше межполюсное расстояние, тем больше выход по току. Если межполюсное расстояние больше 6 см, то выход по току растет незначительно. Если межполюсное расстояние меньше 3 см, то выход по току резко падает, поэтому межполюсное

расстояние должно быть оптимально 4–5 см для нормального протекания электролиза.

Поскольку физические эксперименты по оптимизации работы электролизера затруднительны в связи с дороговизной оборудования и сложностью снятия данных, предпочтительным является путь математического моделирования.

Предложена нестационарная математическая модель для описания физических полей, поверхности раздела жидкий металл–электролит и геометрии ванны. При этом электромагнитные и гидродинамические процессы в электролизере рассматриваются в своей взаимосвязи. В качестве исходных уравнений рассматривается классическая система уравнений магнитной гидродинамики в переменных Эйлера [4]. 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. Предложенная система описывает физические процессы: адвекции и диффузии, трения жидких слоев между собой и на внешних границах, электромагнитной индукции, возмущения сред электромагнитными силами. Система дает динамику основных характерных полей: скоростей, давления, напряженности магнитного поля и плотностей возмущающих электромагнитных сил в средних слоях обеих сред, при этом взаимодействие между средами происходит за счет трения слоев на границе раздела. Входными данными служат гидродинамические и магнитные параметры обеих сред, величины токов, подаваемых на каждый из двадцати двух анодов, начальное распределение скоростей и поверхности раздела, а также конфигурация

расположения анодов и форма настыли. Варьируя эти входные параметры и проводя математический эксперимент, можно судить об устойчивости работы электролизера по результатам расчетов.

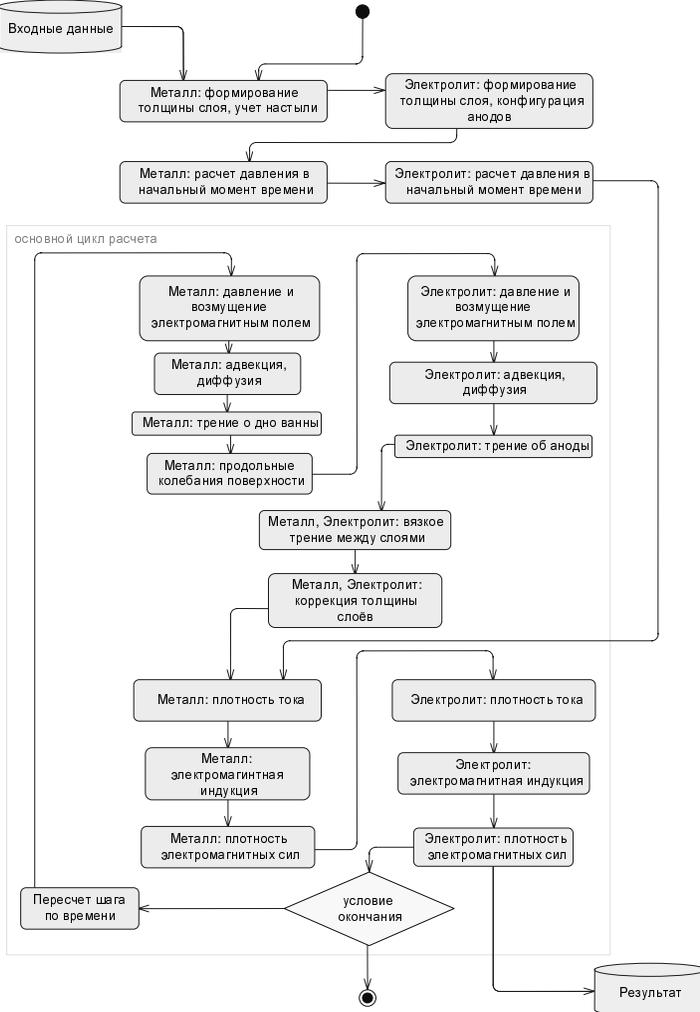


Рис.2. Схема расчёта

Система численно решается с помощью разделения на этапы по физическим процессам (Рис. 2). При этом на отдельных этапах используются разностные схемы, а на отдельных – аналитически полученное точное решение, записанное в разностном виде. Поскольку система существенно нелинейна, аналитически исследовать устойчивость метода представляется затруднительным, однако полуэмпирически получено условие устойчивости численного метода.

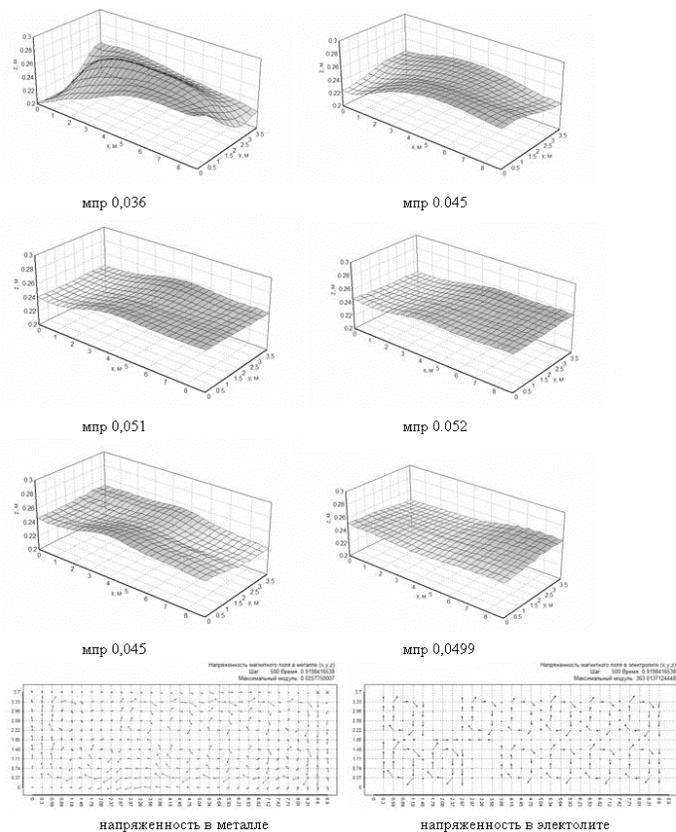


Рис.3. Поверхность раздела и напряженность, извлечены 2 анода

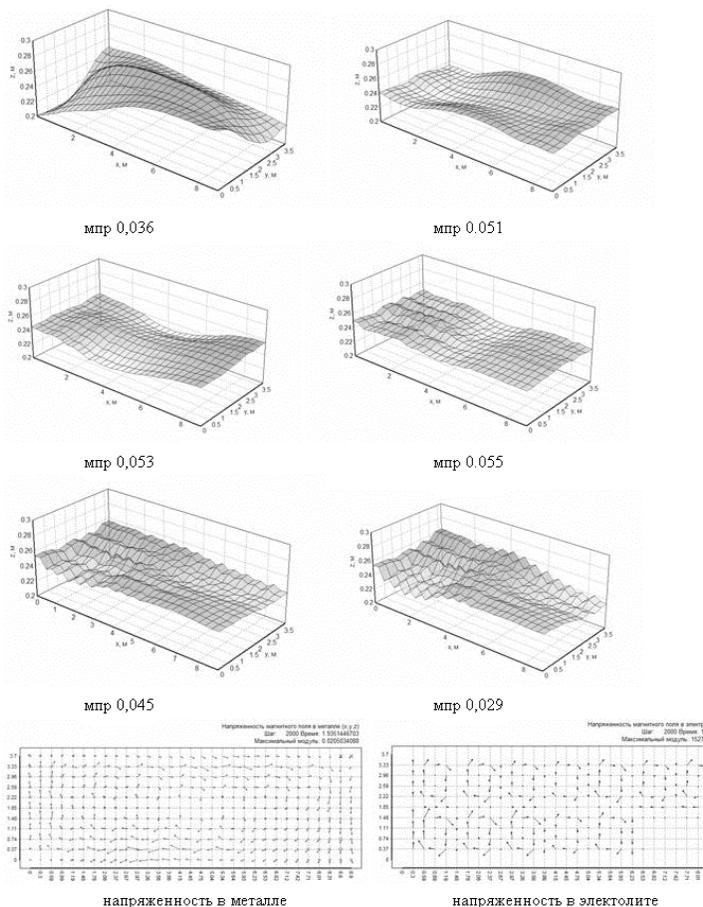


Рис. 4. Поверхность раздела и напряженность, извлечены 2 крайних анода

На рис. 3-4 представлены графики динамики поверхности раздела металл–электролит и напряженностей магнитного поля в обеих средах в случае извлечения различных пар анодов. Так, в случае извлечения двух крайних анодов (рис. 4), в процессе расчета МПР становится ниже допустимого значения, что свидетельствует о неустойчивом поведении. Это совпадает с ожидаемым

поведением поверхности раздела для конкретной ванны, по которой производился расчёт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алаторцев А.В., Кузьмин Р.Н., Проворова О.Г., Савенкова Н.П. Динамическая модель магнитно-гидродинамических процессов в алюминиевом электролизере // Прикладная физика, 2004. — № 5. — С. 33–42.
2. Алаторцев А.В., Кузьмин Р.Н., Проворова О.Г., Савенкова Н.П. Исследование МГД-нестабильности в алюминиевом электролизере // Сб. трудов XI международной конференции «Математика. Компьютер. Образование». — Ижевск, 2004. — Т.2. — С. 501–508.
3. В.И. Быков, В.С. Злобин, В.Н. Тимофеев, Б.М. Багаев, В.В. Пингин, О.Г. Проворова, В.Г. Архипов, В.В. Альчиков, Б.С. Добровец, В.Е. Овчаренко, В.М. Садовский. Математическое моделирование физических полей в алюминиевых электролизерах. — Красноярск, 2002. — С. 75–98.
4. А.А. Самарский, Ю.П. Попов. Разностные методы решения задач газовой динамики. — М.: Наука, 1992.
5. Н.П. Федотьев, А.Ф. Алабышев и другие. Прикладная электрохимия. — Госхимиздат, 1962. — С. 275–330.

THE DYNAMIC MODEL OF INTERFACE IN ALUMINIUM ELECTROLYSIS CELL AT ANODE'S EXTRACTION MOMENT

Alatortsev A. V., Kuzmin R. N., Savenkova N. P.

(Russia, Moscow)

Authors offer dynamical mathematical model describing physical fields and metal-electrolyte interface in an aluminum electrolysis cell. It is not used of expansions of the fields in terms of "basic" and disturbed one. This model describes physical fields in dynamics. The computational method of combined equations of the magneto hydrodynamics is offered.