

## ПРОГРАММА – ИМИТАТОР ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ АЛЮМИНИЯ

Т.В. Пискажова (Сибирский федеральный университет)

На основе математической модели разработана программа, позволяющая с помощью специального интерфейса проводить расчеты и отображать результаты изменений технологических параметров при различных воздействиях на процесс. Программа предназначена для выбора лучших управляющих решений и режимов ведения технологии.

Ключевые слова: математическая модель процесса, виртуальный электролизер.

### Введение

Задача управления технологией электролиза алюминия состоит из двух основных частей.

1. Выбор целевых значений для технологических параметров процесса, способных обеспечить хорошие технико-экономические показатели.

2. Осуществление мероприятий по достижении этих целей.

Первая часть задачи управления осложняется отсутствием единого функционала качества процесса, зависящего от параметров технологии. Себестоимость алюминия, расход энергии и сырья зависят не менее чем от 100 основных переменных электролиза, свойств сырья, конструкции. И не менее половины этих величин взаимозависимы. Поэтому необходим инструмент, позволяющий рассчитывать и отображать изменения технологических параметров при воздействиях на процесс.

Для управления процессом производства алюминия важно знать, как изменения конструкции и технологических параметров отражаются на количественных и качественных характеристиках процессов, происходящих в электролизере.

В прямоугольных ваннах (электролизерах), футерованных углеродистыми материалами, находится на подине слой расплавленного алюминия, выше — слой электролита (рис. 1). На стенках ванны образуется настывль из застывшего электролита. Температура процесса около 960°C. Сверху в ванну опущен угольный анод, частично погруженный в электролит. Катодом служит расплавленный алюминий. Электролитическое разложение глинозема, растворенного в электролите, происходит в междуполосном зазоре анод — металл.

При прохождении тока через токоподводящие элементы и сам электролизер возникают значительные электромагнитные силы, создающие стационарные магнитогидродинамические (МГД) явления в расплавах внутри ванны, а также нестационарные возмущения поверхности раздела. Последнее является серьезной технологической проблемой и возникает при снижении междуполосного расстояния (МПР) меньше критического значения. При этом слишком большое МПР приводит к перегреву электролизера и повышенному расходу энергии.

При прохождении тока через электролит выделяется большое количество тепла, которое, с одной стороны, необходимо для поддержания реакции электролиза, с другой — не должно быть избыточным или недостаточным. Температуры различных слоев и областей электролизера должны быть постоянны и оптимальны, обязательно наличие защитного слоя настывли на бортах электролизера.

### Математическая модель процесса

Таким образом, математическое описание процесса должно содержать следующие разделы.

- Модель магнитогидродинамических явлений в расплавах: деформация поверхности раздела, поля скоростей расплавов.
- Тепловую динамическую модель электролизера: расчет температур выделенных областей и поверхностей, расчет плавления настывли, уровня спекания анода, тепловых затрат на реакции, нагрева сырья.
- Модели массового и электрического балансов: поступление и расход сырья, производство металла, расчет падения напряжения в электролите, прогноз анодных эффектов.

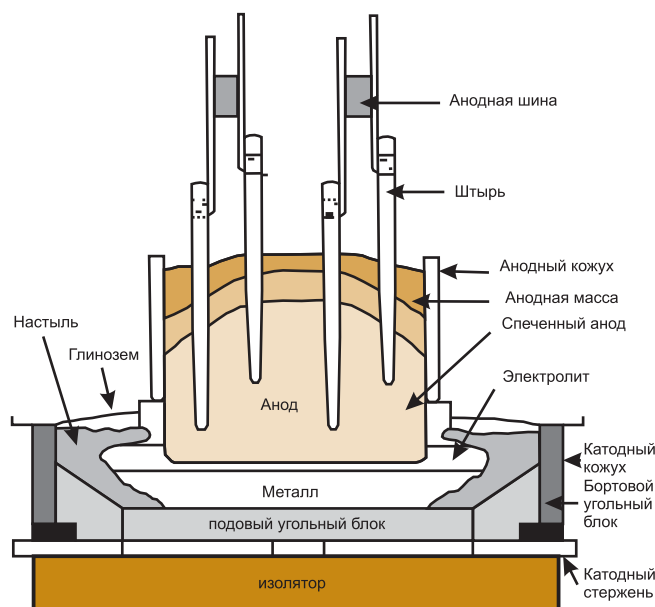


Рис. 1. Поперечный разрез алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом

Модель для управления процессом электролиза построена на обыкновенных дифференциальных уравнениях и зависимостях, полученных предварительным пространственным моделированием; это модель для принятия решений в РВ.

Для задач управления из моделей магнитогидродинамических явлений наиболее важной является модель определения запаса МГД – стабильности электролизера при изменении технологических условий, представленная нами в работе [1]. Там же приведены примеры сравнения рассчитанного и экспериментально определенного запаса МГД – стабильности.

Тепловая модель разработана на основе схематизации электролизера в виде характерных областей и использования нульмерных моделей для описания динамики средних температур металла, электролита, слоев футеровки и анода. Потоки тепла через границы исследуемых областей определяются по одномерным приближениям с учетом фазовых переходов. Уравнения тепловой модели представлены в работах [2, 3].

Модель растворения и потребления глинозема с учетом свойств сырья описывалась нами в [4]. Используемые в модели процесса уравнения электрического и массового баланса, а также вопросы установления адекватности модели были описаны в [5].

Совокупность систем дифференциальных уравнений для расчета средних температур и теплообмена в выделенных областях, а также уравнения массового баланса решаются численно, методом Эйлера.

Порядок работы динамической модели в целом представлен на рис. 2.

Управляющая программа, содержащая динамическую модель, для расчета получает начальные значения технологических переменных (состав и температура электролита, уровни расплавов, значения силы тока и напряжения на электролизере и т. п.) и по заданному типу электролизера использует параметры конструкции электролизера (размеры шахты и анода, толщины и теплофизические свойства футеровки, характеристики магнитного поля). Осуществляется расчет начального состояния, затем после воздействий рассчитываются динамические изменения параметров. Выходными данными могут быть все рассчитываемые моделью переменные – температура областей и поверхностей электролизера, химический состав электролита, толщина настыли, высота спеченного анода, запас МГД стабильности и т.п.

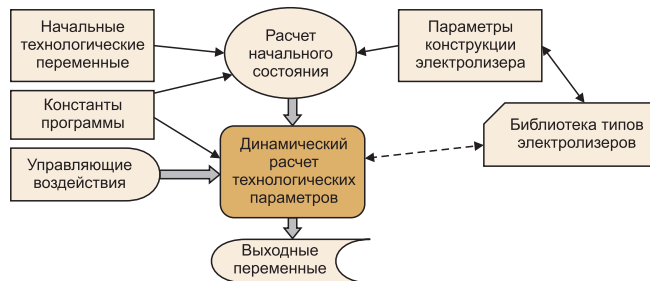


Рис. 2. Схема работы динамической модели процесса электролиза алюминия

Различные алюминиевые компании занимаются разработкой математических моделей процесса. Можно выделить наиболее известные динамические имитаторы [6-9].

Эти модели используются в основном для изучения процесса. В литературе отсутствуют примеры широкого применения многовариантных расчетов с помощью динамических моделей для поддержки принятия технологических решений, также не представлены образцы интерфейсов для практического моделирования.

### Поддержка принятия технологических решений

На основе математической модели процесса была разработана Учебно-консультационная программа "Виртуальный электролизер" [5]. Программа позволяет посредством специального интерфейса рассчитывать и просматривать влияние управляющих воздействий или случайных факторов на параметры процесса и используется для:

- обучения персонала;
- расчетов технологических параметров и технико-экономических показателей при планируемых изменениях процесса,
- выбора регламентов ведения процесса.

Программный комплекс состоит из следующих основных блоков: имитации динамики процесса, управления, ввода/вывода результатов (таблицами и графиками).

Блок имитации (динамическая модель) позволяет рассчитать в виртуальном времени: динамические изменения напряжения, энергобаланса, состава электролита, выхода по току, масс, уровней и температур расплавов, температур выделенных областей и поверхностей электролизера.

Блок управления дает возможность вмешиваться в ход "виртуального" электролиза и производить активные воздействия по изменению алгоритмов управления, изменению управляющих параметров, например, добавлять сырье, изменять ток и напряжение, производить выливку металла. Виртуальные алгоритмы управления идентичны реальным алгоритмам, работающим на электролизерах компании.

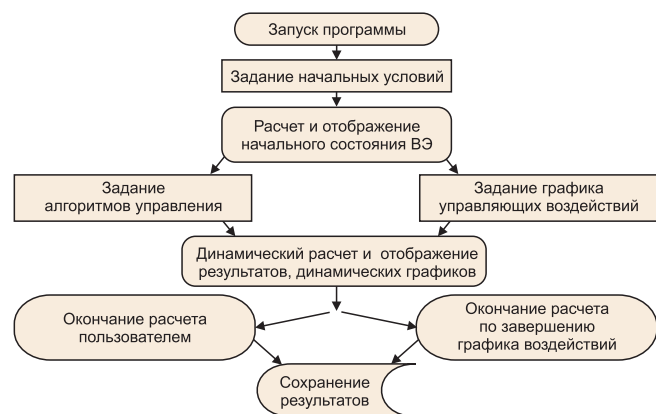


Рис. 3. Порядок работы с программой ВЭ

На рис. 3 представлена схема работы с программой для принятия технологических решений.

Программа имитирует систему управления электролизером и основные технологические операции посредством специального интерфейса. Программный интерфейс имеет два режима расчетов. Первый режим расчета параметров при постоянной концентрации глинозема, второй режим с полной имитацией работы системы автоматической подачи глинозема (АПГ), с изменением концентрации глинозема в результате его поступления и потребления.

Первый режим необходим для расчета теплового баланса и запаса МГД – устойчивости электролизера в результате изменения подводимой мощности, изменений состава электролита, изменений температуры окружающей среды, уральной расплавов.

Второй режим используется для изучения влияния режимов работы АПГ на показатели электролиза, на изменение напряжения, а также возможностей управляющей системы предотвращать анодные эффекты. Также второй режим позволяет рассчитать влияние изменения свойств глинозема на процесс, подобрать настройки АПГ для смягчения последствий смены глинозема.

На рис. 4 представлены средства выбора типа электролизера, начальных условий для расчетов и задания алгоритмов управления. График нескольких одновременных управляющих воздействий также может быть задан таблицей.

На рис. 5 представлены результаты моделирования программой изменений температуры электролита, концентрации глинозема, междуполусного расстояния при работе системы АПГ.

Внизу на графике приведен период АПГ, который говорит о частоте срабатывания дозатора глинозема: меньше период – больше глинозема попадает в электролизер, и наоборот. Видно, что при недостатке глинозема температура растет, при полном отключении питания в 06.00 произошел резкий рост температуры электролита из-за произошедшего анодного эффекта (АЭ). Это электрохимическое явление при обеднении расплава глиноземом характеризуется мгновенным увеличением напряжения на электролизере в 10 раз. В графическом окне программы отображаются изменения параметров в течение суток, справа выводятся текущие значения параметров.

На рис. 6 приведен графический результат решения технологической задачи, состоявшей в подборе величины снижения заданного напряжения и добавочного пи-



Рис. 4. Выбор начальных условий и алгоритмов управления

тания фтористыми солями при увеличении силы тока. При этом нужно было сохранить тепловой баланс электролизера, в частности, температуру электролита и криолитовое отношение (КО). В графическом окне отображены среднесуточные изменения параметров за месяц.

Видно, что вначале при увеличении силы тока температура и КО выросли, но затем при снижении напряжения и увеличении добавки  $\text{AlF}_3$  были стабилизированы. Для стабилизации теплового баланса при увеличении силы тока от 165 до 170 кА необходимо было снизить заданное напряжение от 4,35 до 4,33 В, снизить КО от 2,37 до 2,3. Дополнительный расход сырья  $\text{AlF}_3$  составил при этом 150 кг на 1 электролизер. Новые значения КО и напряжения рекомендованы к выполнению при повышении тока на электролизерах данной конструкции, и таким образом осуществлены предупредительные меры против разогрева электро-

лизера. В работах [10, 11] приводятся другие примеры расчетов технологических регламентов для практических задач разных заводов, выбора целевых значений и показывается эффективность такого способа управления, заключающаяся в предупреждении технологических расстройств и возможности предварительной оценки мероприятий.

Конечно, можно увеличить силу тока и без предварительных расчетов, и опытным путем определить действия по нормализации теплового режима уже по факту нарушения, но это чревато не только временным снижением производительности, но и разрушением бортовой футеровки в связи с расплавлением настыви. Также невозможно определить превентивные меры только на основе технологического опыта, так как технологи работают обычно в узкой области параметров.

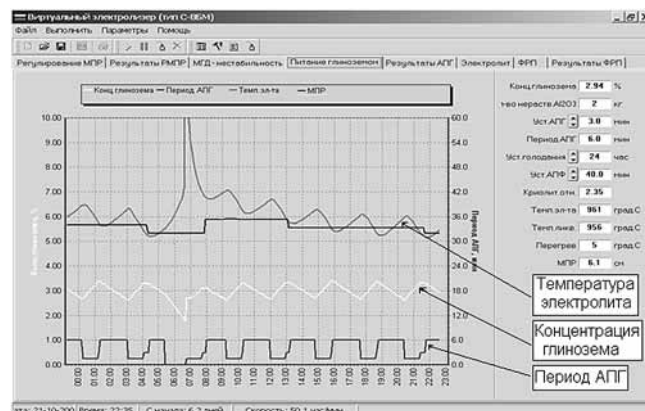


Рис. 5. Расчет изменений температуры электролита и концентрации глинозема при работе АПГ в течение суток



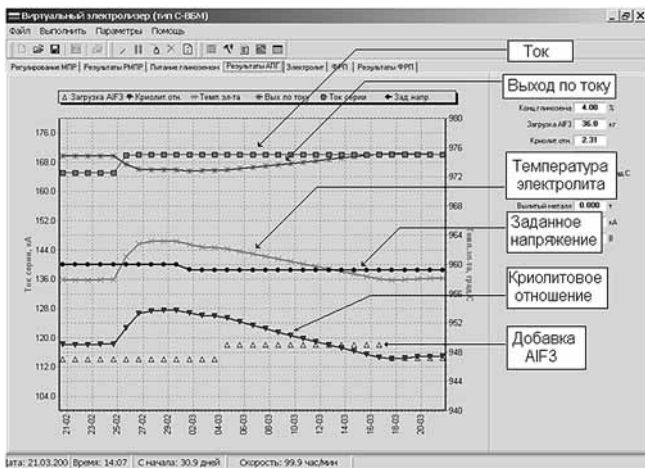


Рис. 6. Среднесуточные изменения параметров при увеличении силы тока в течение месяца

Важной технической задачей является подбор режима питания глиноземом, который обеспечивал бы работу на низкой концентрации глинозема для лучшего растворения, но при этом предотвращал возникновение АЭ. На рис. 7 приведено сравнение различных алгоритмов питания, выполненное с помощью моделирования. На этом рисунке показаны рассчитанные динамической моделью параметры, аналогичные тем, которые технолог видит при визуализации данных АСУТП реальной ванны – напряжение электролизера, приращение напряжения, период АПГ.

Видно, что правый алгоритм (новый) предпочтительнее при работе на низкой концентрации глинозема, так как левый алгоритм (типовой) дает высокие приросты напряжения за маленькие промежутки времени, что не позволяет АСУТП своевременно оценивать концентрацию глинозема и опасно выходом на АЭ. По результатам этого сравнения было принято решение об изменении алгоритмов АПГ на Хакасском алюминиевом заводе.

Использование программного комплекса "Виртуальный электролизер" в итоге позволило:

1. По рассчитанным регламентам провести повышение токовой нагрузки на нескольких сериях электролиза без нарушения теплового режима электролизеров [10].
2. Обосновать выгоду изменения химического состава электролита, определить регламенты переходов к новым составам с наименьшими затратами [11].
3. Выбрать режимы системы автоматического питания глиноземом, наиболее устойчивые к изменению его свойств, а также оценить возможные улучшения управления от внедрения новых алгоритмов АПГ.

#### Заключение

Разработанная программа для моделирования процесса электролитического получения алюминия

*Пискажова Татьяна Валериевна — канд. техн. наук, докторант Сибирского федерального университета.  
Контактный телефон (963)267-17-09. E-mail: Piskazhova@yandex.ru*

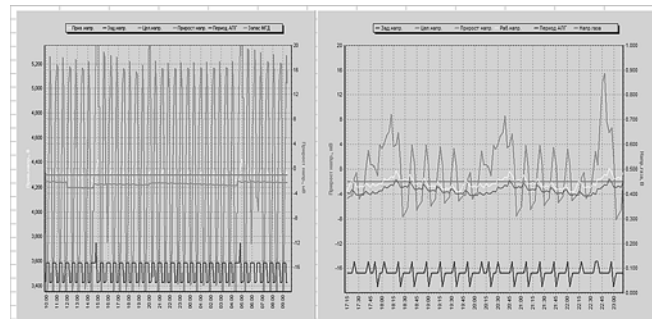


Рис. 7. Сравнение работы различных алгоритмов питания

позволяет имитировать технологические события, просматривать результаты воздействий и работы алгоритмов, подбирать новые целевые значения параметров при планируемых изменениях и благодаря этому принимать более эффективные решения при управлении ТП.

#### Список литературы

1. Коростелев И.Н., Пискажова Т.В., Проворова О.Г., Синельников В.В. Разработка методики использования критерия устойчивости Бояревича-Ромерио в алгоритмах АСУТП электролиза алюминия // Вестник КрасГУ. Серия физ.-мат. науки. Красноярск. 2005. Вып. 3.
2. Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В., Емельяшин М.В. Тепловая динамическая модель для управления технологией электролиза алюминия // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. ак. М.Ф. Решетнева. Вып. 5 (12). 2006.
3. Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В. Тепловая динамическая модель для автоматического управления технологией производства алюминия // Вестник КазНУ. Вычислительные технологии. Т. 13. 2008. №3(58).
4. Berežin A.I., Isaeva L.A., Belolipetsky V.M., Piskazhova T.V., Sinelnikov V.V. A model of Dissolution and Heating of Alumina Charged by Point-Feeding System in "Virtual Cell" program // Light Metals. 2005.
5. Yurkov V.V., Mann V.C., Piskazhova T.V., Nikandrov K.F. Virtual Aluminum Reduction Cell // Light Metals. 2001.
6. Tang H.Q., N. Urata, Read C.M. Response of a Hall- Heroult cell to step – changes in operating conditions measurements and dynamic simulations // Light Metals. 1998.
7. Meghlaoui A.; Mohamed Y. A., Jolly B. Real time simulator tool for training and development in reduction cell // Light Metals. 1999.
8. Hashimoto T., Ikeuchi T. Computer simulation of Dynamic behavior of an aluminum reduction cell // Light Metals. 1980.
9. Dupuis M., Haulin W. Performing fast trend analysis on cell key design parameters // Light Metals. 2003.
10. Пискажова Т.В., Своевский А.В., Попов Ю.А., Бузунов В.Ю. Использование программы "Виртуальный электролизер" для анализа и выбора технологических регламентов при поднятии тока // Алюминий Сибири. Сб. статей. Красноярск. 2003.
11. Колесов М.С., Пискажова Т.В. Разработка технологических регламентов с помощью ПО "Виртуальный электролизер" на ОАО НКАЗ // Техничко-экономический вестник РУСАЛа. 2004. №9.