

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ «ВИРТУАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОЛИЗЕР»

Пискажова Т.В. (Красноярск)

Введение

Достаточно давно специалисты по автоматизации и управлению технологическими процессами стали отмечать важность управления техническим объектом не как «черным ящиком», как принято в классической автоматизации, а с выяснением и моделированием физики и химии происходящих в объекте процессов. Это связано с необходимостью повышения эффективности управления, энерго- и ресурсосбережения и, кроме управления «по отклику», становится необходимым предсказательное, упреждающее управление, которое невозможно без имитационных моделей.

Одной из первых работ, представляющих модель процесса электролитического получения алюминия для решения проблем автоматизированного управления технологическим процессом (АСУТП), была статья [1]. Разумеется, моделированию алюминиевых электролизеров и процессам, в них происходящим, посвящено гигантское число работ, но совсем немного работ, посвященных решению проблем АСУТП. В работе [2] авторы делают обзор использования предсказательных моделей в управлении. В работах [3] и [4] авторы представляют интерфейсы программ для обучения персонала и исследования процесса на основе балансовых моделей.

Ниже будет представлено описание технологии, из которой следует необходимость разработки комплексной математической динамической модели процесса на основе детерминированного подхода. Коротко отметим, что сложные взаимосвязи технологических параметров процесса, взаимодействие теплового, массового, электрического балансов, порождающее значительную нелинейность объекта управления, побудили коллектив авторов создать «Виртуальный электролизер». Этапы разработки и начала применения модели можно увидеть в работах [5-8]. Полное описание математических моделей, примеров расчетов, направлений применения модели на тот период, достигнутой эффективности представлено в монографии [9]. Новые направления применения частично будут представлены в этой статье.

В настоящее время исследование процесса электролиза методами математического моделирования продолжается, но в основном на основе стохастических моделей, что несомненно является перспективным как с точки зрения выяснения неизвестных детерминированной металлургической науке зависимостей и связей, так и с точки зрения уточнения локальных связей между контролируемыми параметрами.

Технология получения алюминия.

Получение алюминия электролизом глинозема, растворенного в расплавленном криолите, было одновременно предложено в 1886 году французом П. Эру и американцем Ч. Холлом. С тех пор метод Эру – Холла не претерпел принципиальных изменений. Сущность его состоит в следующем. В прямоугольных ваннах (электролизерах), футерованных углеродистыми материалами, находится на подине слой расплавленного алюминия, выше слой электролита – криолитоглиноземных сплавов. Температура процесса около 960 °С. На стенках ванны образуется настывль из застывших солей – это формирует рабочее пространство электролизера. Сверху в ванну

опущен угольный анод, частично погруженный в электролит. При прохождении тока через электролит из растворенного глинозема выделяется алюминий и оседает на катоде. Роль катода в электрохимическом процессе играет металл. Производство алюминия является одним из самых энергоемких процессов, при этом примерно 50% подводимой мощности теряется в виде тепла в окружающую среду. На рис. 1 представлен поперечный разрез алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом. Ток поступает на штыри, проходит через анод, электролит, металл, подовый угольный блок и через катодные стержни отводится на следующий электролизер. Электролизеры последовательно соединены в электрической цепи корпуса.

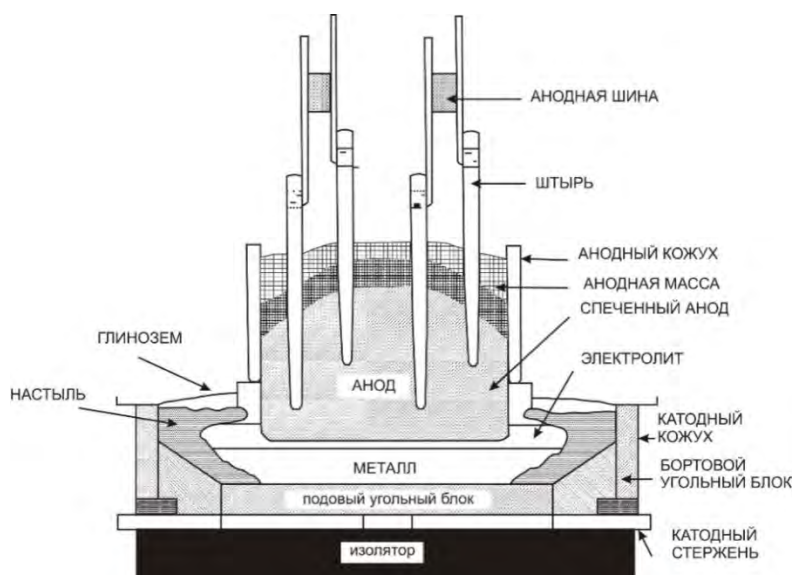


Рис. 1. Поперечный разрез алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом

В общую цепь (серию) последовательно включается 140 – 300 электролизеров, которые соединяются ошиновкой. Напряжение на ванне в зависимости от срока службы и конструкции меняется от 3,5 до 5,0 В. Величина тока, подводимая к электролизеру, зависит от конструкции, точнее конструкция проектируется на определенную величину тока. Электролизеры, подобные изображенному на рис. 1, работают при силе тока 100 – 200 кА. Современные электролизеры с обожженными анодами (ОА) работают при силе тока 300 – 550 кА.

Управление происходит на каждом электролизере отдельно, важно обеспечить эффективность управления каждым электролизером с учетом его индивидуальных особенностей. Управление серией может осуществляться автоматически только изменением силы тока.

На рис. 2 представлена структурная схема современного управления алюминиевым электролизером.

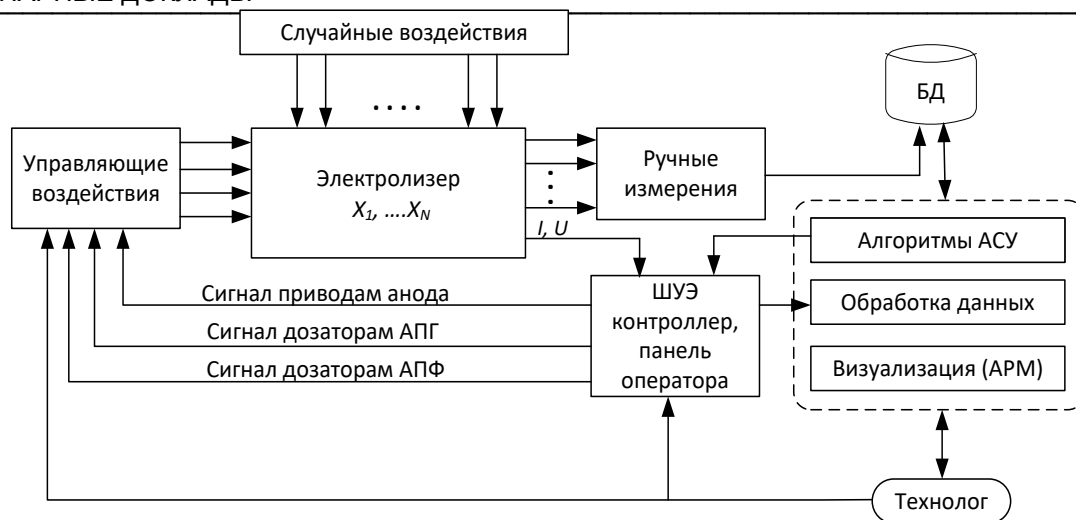


Рис. 2. Схема управления алюминиевым электролизером

Процесс не является полностью автоматизированным, этому препятствуют недостаточность измерений и нехватка знаний о поведении объекта управления. Шкаф управления электролизером (ШУЭ), основными компонентами которого являются контроллер и панель визуализации и управления, осуществляет управление междуполюсным расстоянием (МПР) посредством движения анодного массива, управление подачей глинозема посредством передачи сигналов дозаторам АПГ, и также управление автоматической подачей фторсолей (АПФ). На электролизер могут оказываться дополнительные «ручные» воздействия, назначаемые технологом, например, добавка криолита, слив электролита и др. Изменение силы тока является тоже управляющим воздействием, но оно осуществляется на серию электролизеров. К случайным воздействиям можно отнести изменения температуры окружающей среды, свойств сырья, технологические операции выливки, обработки. Датчики АСУТП измеряют только падение напряжение на электролизере, силу тока серии. Автоматически фиксируются анодные эффекты и действия системы управления. Большая часть измерений проводится вручную, периодически. Также проблемой является нелинейность объекта управления. Тепловой и химический баланс связаны между собой через плавление настыли и гарнисажа. Изменение масс расплавов, количества сырья в аппарате, влияет на тепловой баланс и содержание веществ. Электрический баланс связан с перечисленным через электропроводность, МПР и другие параметры электрохимического процесса. Поэтому для управления необходимо использование модели в качестве виртуального датчика.

Верхний уровень (ВУ) АСУТП выполняет функции обработки измеренных ШУЭ электрических параметров, визуализацию изменения параметров на электролизере, а также содержит алгоритмы автоматического управления. У технолога остается функция выбора целевых значений параметров. Но большинство технологических переменных связаны между собой, улучшение одного параметра может вызвать ухудшение других. Необходимы оптимальные величины технологических параметров, но поиск оптимальности должен осуществляться для взаимосвязанных параметров. Следует отметить, что интервал оптимальности, область эффективной работы невозможно найти только экспериментальными методами и подбором на работающих электролизерах. Поэтому нужен инструмент, позволяющий рассчитывать и отображать результаты предполагаемых технологических решений и определять средства их достижения.

В связи с перечисленными проблемами была разработана динамическая модель процесса электролитического получения алюминия и работы алюминиевого

электролизера. Эта модель была реализована в виде нескольких программ для управления процессом, для обучения и для консультаций:

1. Стабилизация состава электролита на базе математической модели (ССЭ)[10].
2. Автоматическая система управления тепловым балансом (АСУТБ) [11].
3. Учебно-консультационная программа «Виртуальный электролизер» (ВЭ) [12].

Состав математической модели процесса электролиза, описание основных блоков

Любой динамический расчет состоит из трех этапов:

- расчет начального состояния переменных модели;
- внесение воздействия на переменные модели;
- расчет динамики переменных после воздействия.

На рис. 3 представлены этапы и основные расчетные блоки динамической модели и порядок их взаимодействия. Структурно модель представляет собой систему взаимосвязанных блоков. Каждый блок может быть системой дифференциальных уравнений (например, нагрев глинозема, вычисление температур слоев электролизера, изменение толщины настыли); статистической зависимостью (выход по току, потери AlF_3 от срока службы), системой экспериментальных зависимостей, полученной в лабораторных условиях (расчет обратной ЭДС, критической плотности тока, температуры ликвидуса и др.).

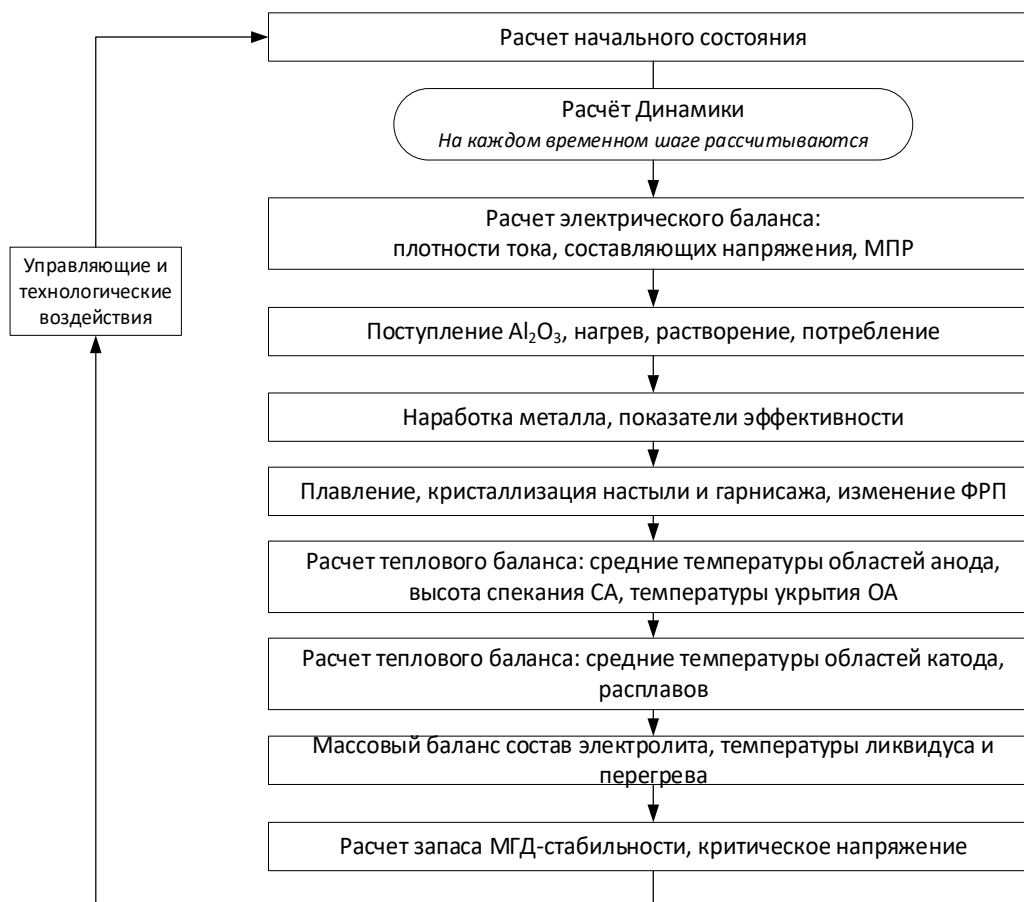


Рис. 3. Основные блоки динамической модели процесса электролиза

Опишем представленные блоки. Полное математическое и структурное описание модели представлено в работе [9].

Расчет начального состояния. Перед началом моделирования выбирается тип электролизера из имеющейся библиотеки типов электролизеров и в модель вводятся

данные о конструкции электролизера: геометрические размеры катода и анодных устройств; данные о толщинах слоев футеровки, теплоизоляции, теплопроводности; плотность, теплоемкость материалов. Также в библиотеке типов электролизеров имеются измерения вертикальной компоненты магнитного поля.

Другой вид входных данных – присвоение начальных значений технологическим переменным. Это температура электролита, уровни металла и электролита, химический состав электролита, толщина глиноземной засыпки верха электролизера, напряжение электролизера, ток серии, параметры анода, температура окружающей среды. Производится расчет начального стационарного теплового баланса, температур областей электролизера, толщины настывли, междупольсного расстояния, выхода по току, коэффициентов теплообмена, масс электролита и металла. Так как несколько вычисляемых параметров являются взаимосвязанными, по одному из них производится итерация до заданной точности.

Расчет электрического баланса. Сила тока в ходе динамических расчетов может быть равна заданному начальному значению, а может изменяться в ходе расчетов. Изменение напряжения электролизера может задаваться пользователем модели или меняться от электрохимии процесса. Исходя из напряжения электролизера, рассчитываются падение напряжения в электролите и междупольсное расстояние, программа рассчитывает составляющие напряжения по методике Хаупина [13]. Рассчитываются омическое падение напряжения в МПР, добавочное сопротивление газовых пузырей с возникновением анодных эффектов, обратная ЭДС, в том числе равновесный потенциал и перенапряжения. Модель может получать значения тока, напряжения электролизера, напряжения анода из базы данных.

Расчет поступления, нагрева, растворения и потребления глинозема. Моделируется поступление глинозема при подаче через систему автоматического питания глиноземом (АПП). Отдаваемая доза растворяется по закону, зависящему от свойств глинозема, состава и температуры электролита, массы дозы. Тепло на нагрев и растворение глинозем получает из электролита. Концентрация глинозема в электролите на каждом расчетном шаге определяется как разность масс растворенного и потребленного глинозема.

Расчет наработки металла, показателей эффективности. Получение металла определяется по закону Фарадея. Выход по току рассчитывается по формуле, основанной на экспериментальных измерениях [14], и определяет приход тепла от обратной реакции. Также с учетом выхода по току определяются виртуально произведенный металл, расход электроэнергии, анода, глинозема [15].

Плавление и кристаллизация настывли. Определяется изменение толщины настывли и гарнисажа. Скорость плавления настывли определяется как функция разности прихода тепла из электролита и тепла, отводимого через настывли и бортовую футеровку. Этот блок осуществляет расчет изменения температуры футеровки и кожуха. Изменение формы рабочего пространства обусловлено плавлением или намерзанием электролита на боковых стенках ванны.

Расчет теплового баланса. Используя значения тока и напряжения электролизера и анода, блок вычисляет приход тепла в электролите. При этом определяются теплообмены: металл–электролит, электролит–гарнисаж, электролит–анод, металл–настывль, металл–подина. Приход тепла складывается из тепла подведенной энергии и тепла обратной реакции. Расход тепла складывается из тепловых потерь в окружающую среду, расхода тепла на основную реакцию и расхода тепла на нагрев и растворение глинозема. Исходя из разницы прихода и расхода тепла в электролите, определяется изменение температуры электролита.

Определяются температуры поверхностей. Для описания динамики средних температур металла, электролита, слоев футеровки и анода используются нульмерные

модели. Потоки тепла через границы исследуемых областей определяются по одномерным приближениям с учетом фазовых переходов.

Расчет баланса масс, состава электролита, перегрева. Блок использует заданные значения уровней электролита и металла и пересчитывает массы электролита и металла с учетом геометрии электролизера. По имеющимся или прогнозируемым значениям химического анализа электролита определяется температура ликвидуса и температура перегрева, плотность и вязкость расплавов. Учитывается приход криолита из настыли.

В работающий электролизер периодически загружают глинозем, фтористые соли, анодную массу. Из электролизера постоянно выделяются анодные газы и фториды. Происходит накопление и периодическая выливка металла. Иногда удаляют избыточную массу электролита или добавляют электролит. С помощью модели материального баланса для каждого момента времени рассчитываются значения таких технологических переменных, как состав электролита (в том числе криолитовое отношение), массы и уровни металла и электролита, а также массы настыли, гарнисажа.

Расчет запаса МГД-стабильности. Методика расчета запаса магнито-гидродинамической стабильности, разработанная специально для динамической модели, первоначально основывалась на работе [16]. Затем был получен критерий, связывающий технологические параметры и Фурье-коэффициенты вертикальной компоненты магнитного поля электролизера. В результате работы этого блока находится критическое напряжение электролизера, то есть минимально возможное расстояние от подошвы анода до поверхности металла, при котором электролизер работает еще без технологического нарушения «волнение металла».

Управляющие и технологические воздействия. Блок осуществляет взаимодействие между интерфейсом программ, использующих модель, и переменными модели. Воздействия зависят от того, в состав какой программы входит модель. В программе ССЭ используются данные о ежесуточных значениях загруженных на электролизер доз AlF_3 , CaF_2 , флотации, о составе сырья, а также данные среднесуточных значений электрических параметров.

В интерфейсе программы ВЭ имитируются управляющие воздействия: движение анода по заданию управляющих алгоритмов; добавка глинозема по графику, по заданию алгоритма или в системе АПГ; добавка фторида алюминия по графику или дополнительно; регулирование тока и напряжения; регулирование уровней расплавов. Можно имитировать технологические операции по замене анода, организовать расчет оптимальных способов повышения эффективности.

Математические модели теплообмена

Несмотря на сложность процессов в электролизере, концепция моделирования динамического теплообмена основывается на простом балансовом уравнении (1). Пусть Ω – заданный объем, Γ – его граница.

$$cM \frac{d\hat{T}}{dt} = \int_{\Gamma} Q_{\Gamma} d\Gamma + \Omega \hat{f}, \quad (1)$$

где M – масса среды в объеме Ω . Здесь \hat{T} – средняя температура по объему; c – удельная теплоемкость; Q_{Γ} – потоки тепла через границу; \hat{f} – внутренние источники тепла. На рис. 4 приведены схемы для определения теплообмена между выделенными областями электролизера.

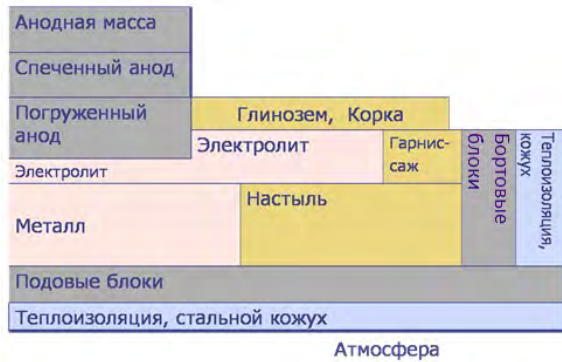


Схема бортовой футеровки

Рис.4. Схемы для тепловых расчетов

Расчет производится по вертикали – тепло выделяется в электролите и передается вверх, в слой анода и вниз в металл, подину; и по горизонтали – тепло теряется в бортовую футеровку и в боковые поверхности анода. Таким образом создается «псевдотрехмерность».

Приведем пример вертикального расчета в катоде. Теплообмен в областях глинозема, корки, электролита, металла, подовых блоков, теплоизоляции описывается следующими уравнениями относительно средних температур:

$$\begin{aligned}
 c_{\text{Э}} M_{\text{Э}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{Э}}}{dt} &= Q_1 + Q_{\text{ан}} - Q_{\text{Э-Н}} - Q_{\text{Э-М}} - Q_{\text{Г}} - Q_{\text{Р}} - Q_{\text{Э-кор}}, \\
 c_{\text{М}} M_{\text{М}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{М}}}{dt} &= Q_{\text{Э-М}} - Q_{\text{М-Н}} - Q_{\text{М-к}}, \\
 c_{\text{Г}} M_{\text{Г}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{Г}}}{dt} &= Q_{\text{кор-Г}} - Q_{\text{Г-ат}}, \\
 c_{\text{кор}} M_{\text{кор}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{кор}}}{dt} &= Q_{\text{Э-кор}} - Q_{\text{кор-Г}}, \\
 c_{\text{к}} M_{\text{к}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{к}}}{dt} &= Q_{\text{М-к}} - Q_{\text{к-дн}} + Q_{\text{qк}} - Q_{\text{к-борт-ат}}, \\
 c_{\text{дн}} M_{\text{дн}} \cdot \frac{d\hat{T}_{\text{дн}}}{dt} &= Q_{\text{к-дн}} - Q_{\text{дн-ат}} - Q_{\text{дн-борт-ат}},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где \hat{T}_i – средние температуры соответствующих слоев, К, Q_1 – приход тепла от электроэнергии в электролите, Вт, $Q_{\text{ан}}$ – теплообмен с анодом, Дж, c_i – удельные теплоемкости соответствующих материалов, Дж/(кг·К), M_i – массы соответствующих областей, кг, $Q_{\text{Г}}$ – потери тепла на нагрев и растворение глинозема, Дж, $Q_{\text{Р}}$ – расход тепла на основную реакцию, Дж, $Q_{\text{qк}}$ – тепловой поток от внутреннего источника тепла в катоде, Вт.

Потоки тепла через границы рассматриваемых слоев находятся по выписанным ниже формулам:

$$Q_{\text{Э-н}} = S_{\text{Э-н}} \cdot \alpha_{\text{Э-н}} (\hat{T}_{\text{Э}} - T_{\text{лик}}^{\text{Э}}) - \text{тепловой поток из электролита в настыль,}$$

$T_{\text{лик}}^{\text{Э}}$ – температура ликвидуса электролита;

$$Q_{\text{Э-М}} = S_{\text{Э-М}} \cdot \kappa_{\text{Э-М}} (\hat{T}_{\text{Э}} - \hat{T}_{\text{М}}) - \text{тепловой поток из электролита в металл;}$$

$$Q_{\text{кор-Г}} = S_{\text{кор-Г}} \cdot \kappa_{\text{кор-Г}} (\hat{T}_{\text{кор}} - \hat{T}_{\text{Г}}) - \text{от корки к глинозему на корке}$$

$Q_{M-k} = S_{M-k} \cdot \kappa_{M-k} (\hat{T}_M - \hat{T}_k)$ – из металла в катод;

$Q_{M-n} = S_{M-n} \cdot \alpha_{M-n} (\hat{T}_M - T_{лик}^M)$ – из металла в настыль;

$Q_{\Gamma-am} = S_{\Gamma-am} \cdot \alpha_{\Gamma-am} (T_{\Gamma}|_{z=0} - T_{am})$ – с поверхности глинозема в атмосферу, $T_{\Gamma}|_{z=0}$ – температура поверхности глинозема;

$Q_{\kappa-дн} = S_{\kappa-дн} \cdot \kappa_{\kappa-дн} (\hat{T}_{\kappa} - \hat{T}_{дн})$ – из подовых блоков в теплоизолирующее дно;

$Q_{дн-am} = S_{дн-am} \cdot \alpha_{дн-am} (T_{дн}|_{\Delta_{дн}} - T_{am})$ – поток с наружной поверхности дна в атмосферу.

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{\Gamma-am}, \alpha_{дн-am}, \alpha_{\varepsilon-n}, \alpha_{M-n}$ считаются заданными, а коэффициенты теплопередачи $\kappa_{кор-\Gamma}, \kappa_{\varepsilon-M}, \kappa_{M-k}, \kappa_{\kappa-дн}$ вычисляются по формулам

$\kappa_{i-j} = 2 / \left(\frac{\Delta_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta_j}{\lambda_j} \right)$, где Δ_i, λ_i – толщина и теплопроводность слоя.

С использованием условия фазового перехода (условие Стефана) получена формула для динамического расчета толщины настыли:

$$\delta_4^{n+1} = 0.5 \left(\delta_4^n - \frac{\Delta t \cdot \alpha_{\varepsilon-n}}{\rho_n L_n} (\hat{T}_{\varepsilon} - T_{лик}^{\varepsilon}) \right) + \sqrt{0.25 \left(\delta_4^n - \frac{\Delta t \cdot \alpha_{\varepsilon-n}}{\rho_n L_n} (\hat{T}_{\varepsilon} - T_{лик}^{\varepsilon}) \right)^2 + \frac{2\lambda_4 \Delta t}{\rho_n L_n} (T_{лик}^{\varepsilon} - \hat{T}_4)}, \quad (3)$$

где \hat{T}_4 – температура бортового блока, которая вычисляется по аналогичным (2) динамическим уравнениям для бортовой футеровки, К.

Формула (3) для определения толщин настыли в металле и электролите отражает связь массового и теплового баланса электролизера, что необходимо для управления химическим составом электролита.

Была проведена очень большая работа по идентификация модели, этому посвящена глава в монографии [9], объемы статьи не позволяют привести здесь сравнение рассчитанных и измеренных графиков откликов параметров объекта.

Управление процессом получения алюминия с помощью имитационной модели

На рис. 5 представлена схема внедрения математической модели «Виртуальный электролизер» в различные области управления электролизным производством на различных заводах компании РУСАЛ.

Программа «Стабилизация состава электролита на базе математической модели» (ССЭ) содержится модулем в составе верхнего уровня АСУТП, получает необходимые данные из БД, осуществляет расчет химического состава электролита в отсутствие анализов и рассчитывает оптимальное количество добавки сырья по каждому электролизеру. Передает задание на добавки автоматической системе подачи фторсолей, в случае ее отсутствия технологу в виде таблицы добавок по всем электролизерам. Подробно алгоритмы программы можно посмотреть в [17].

Эта программа внедрена в настоящее время на большей части электролизных производств РУСАЛа, но экономический эффект оценивался нами при ее эксплуатации на 3 заводах компании – Красноярском, Новокузнецком и Хакасском алюминиевых заводах. При внедрении программы был получен экономический эффект, состоявший:

- В улучшении качества управления – снижении СКО КО от целевого значения не менее чем на 0,03 единицы.
- В исключении трудозатрат технологов на составление задания по добавке сырья – это составляет около часа в день.
- В снижении удельного расхода AlF_3 в среднем на 1 кг на тонну алюминия, иногда до 3 кг/т Al. Это составляет от 3 до 8 % удельного расхода сырья.

Устойчивое управление КО позволило КраЗу и НкАЗу снизить КО на 0,15 единицы, что дает повышение выхода по току на 1,5%.

Последняя цифра очень значительна, поскольку идет технологическая борьба за повышение показателя эффективности «выход по току» на доли процента. Цифры по экономии сырья возможно предстают не такими значительными, но заводами производятся миллионы тонн алюминия, стоимость AlF_3 равна примерно стоимости сахара и кроме того, экономиться тот фтористый алюминий, который не улетел в атмосферу в случае отсутствия систем сухой газоочистки.

Именно поэтому программа ССЭ получила широкое и длительное распространение.

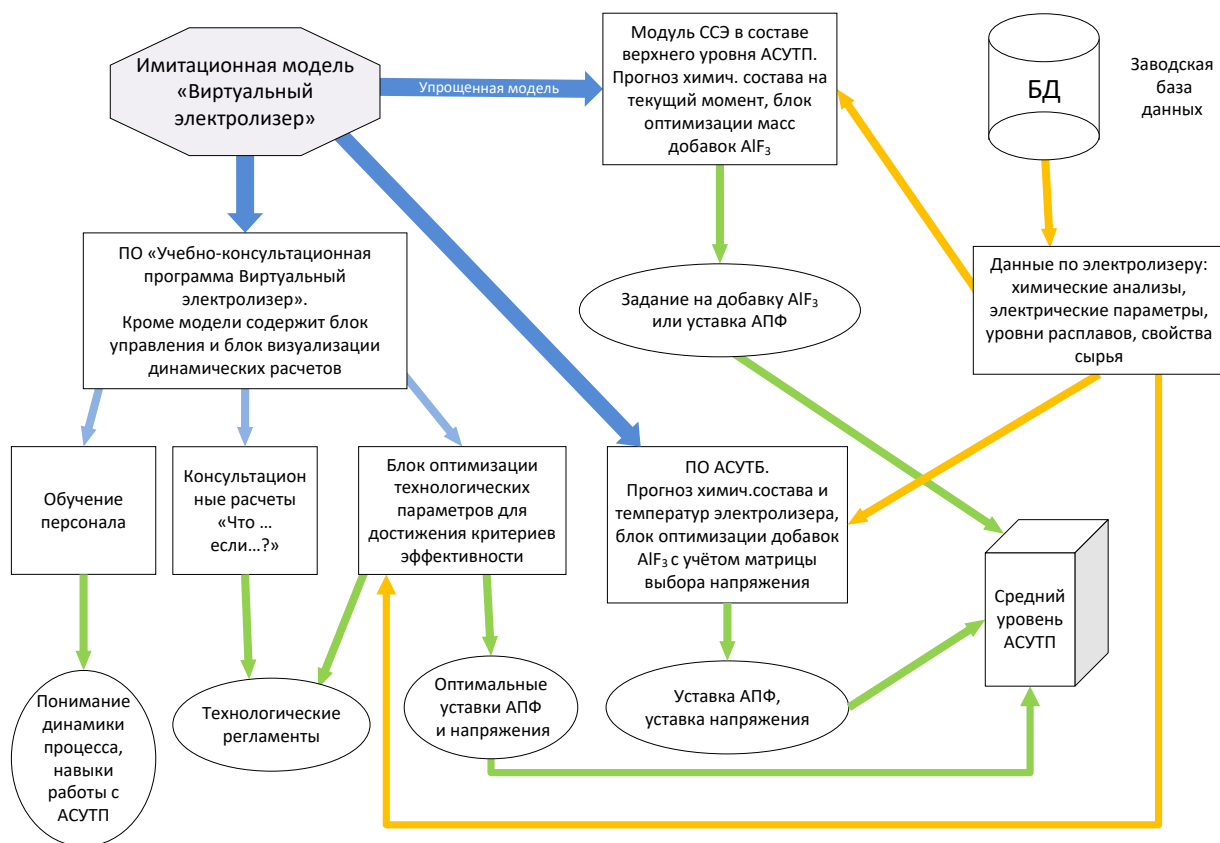


Рис. 5. Схема применения имитационной модели «Виртуальный электролизер» при получении алюминия-сырца в компании РУСАЛ

Программное обеспечение «Автоматическая система управления тепловым балансом» (АСУТБ) является не таким популярным и внедрено на Иркутском алюминиевом заводе, для которого и разрабатывалась. Является некоторым промежуточным решением между оптимизацией только добавок сырья и оптимальным выбором любых взаимосвязанных управляющих воздействий. С помощью предварительных расчетов на ПО ВЭ была составлена матрица добавок к заданному напряжению в зависимости от химсостава и температуры электролита, и уже после назначенного матрицей напряжения на электролизер оптимально выбираются добавки сырья. Эффект от внедрения указан в патенте [11].

Использование программного комплекса «Виртуальный электролизер» в качестве программы-советчика в период до 2009 года позволило:

- По рассчитанным регламентам провести повышение токовой нагрузки на нескольких сериях электролиза на Красноярском, Братском, Новокузнецком алюминиевых заводах без нарушения теплового режима электролизеров.
- Обосновать выгодность изменения состава электролита, определить регламенты переходов к новым составам с наименьшими затратами. Рассчитанные регламенты использовались при переходе на литиевые электролиты на Новокузнецком заводе, снижении криолитового отношения электролита на разных заводах.
- Выбрать режимы системы автоматического питания глиноземом, наиболее устойчивые к смене глинозема на Красноярском заводе.
- Оценить возможные улучшения управления от внедрения новых алгоритмов питания глиноземом для Хакасского и Красноярского алюминиевых заводов.

Далее, до 2015 года программа использовалась мало, но затем наступил период ее реорганизации, она была переписана в новой среде разработки, произошли значительные структурные перестройки, библиотека типов электролизеров была вынесена за рамки программы для возможности корректировки технологами, виртуальные алгоритмы управления переписаны в соответствии с алгоритмами реального АСУТП, значительно изменен интерфейс. Были разработаны методические пособия для обучения алгоритмам современного АСУТП на базе этой программы, созданы интерактивные примеры и лабораторные. И важнейшим изменением в этом ПО стала разработка блока комплексной оптимизации технологических параметров для достижения либо установленных целей, либо заданных критериев эффективности (нужный выход по току, расход электроэнергии). Поэтому этой программе посвятим отдельный раздел.

«Виртуальный электролизер» – цифровой двойник процесса электролитического получения алюминия

Первоначально программа «Виртуальный электролизер» разрабатывалась в ИТЦ РУСАЛ, последняя версия является совместной разработкой кафедры АППМ СФУ и ИТЦ РУСАЛ [12]. Правообладателем программы является Инженерно-технологический центр РУСАЛа, на средства которого она была создана.

Программа «Виртуальный электролизер» предназначена для:

- обучения технологического персонала управлению различными типами электролизеров, приемам диагностики состояния электролизера;
- динамического моделирования реакции электролизёра на изменение установок и настроек АСУТП электролиза алюминия;
- динамического моделирования технологического процесса производства алюминия и прогнозирования состояния электролизера, в зависимости от первоначальных условий и изменяющихся внутренних и внешних воздействий на процесс электролиза;
- оптимизации ведения технологического процесса за счет использования инструментов моделирования, модификации алгоритмов управления и анализа накопленной технологической информации.

Программный комплекс состоит из следующих основных блоков: библиотеки конструкций электролизеров, блока имитации динамики процесса, блока управления, блока ввода – вывода результатов (в виде таблиц и графиков), блока оптимизации.

Рассмотрим работу этой программы с помощью изображений интерфейса.

После запуска программы появляется окно ввода начальных условий (рис.6), которое содержит геометрические размеры выбранной конструкции, начальные значения электрических параметров, уровней расплавов и химического состава. Эти данные загружаются из файла выбранной конструкции. Можно выбрать начальные условия из БД заводов КраЗ и САЗ по заданному корпусу и электролизеру, если имеется доступ. Тип электролизёра можно выбрать как из папки в дистрибутиве (рис.7), так и с помощью кнопки «Обзор...» из любой папки на компьютере, где можно создать свою библиотеку типов для внесения пробных изменений в файлы конструкций.

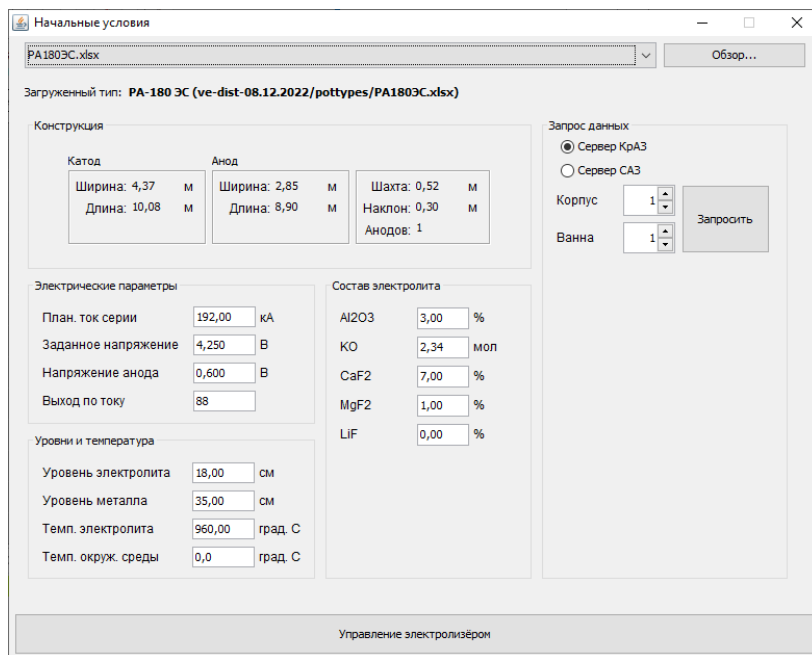


Рис. 6. Окно ввода начальных условий

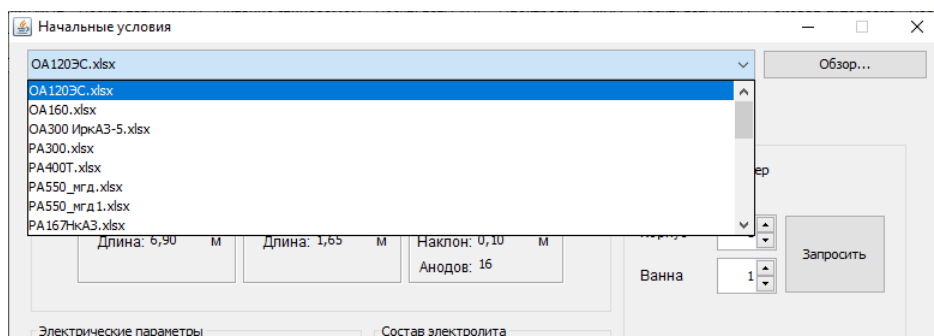


Рис.7. Выпадающее меню выбора конструкции

Нажатие кнопки «Управление электролизёром» загружает параметры выбранной конструкции электролизёра в программу и открывает окно управления (рис.8), где можно изменять параметры управления, настройки АСУТП. Основное окно программы представлено на рисунке 9, точнее на этом рисунке представлены два графика, вызываемых на основном окне.

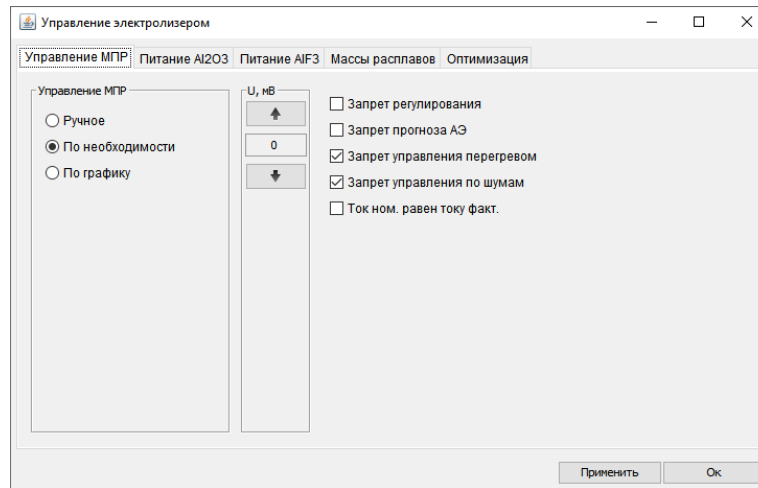


Рис.8. Окно управления электролизёром

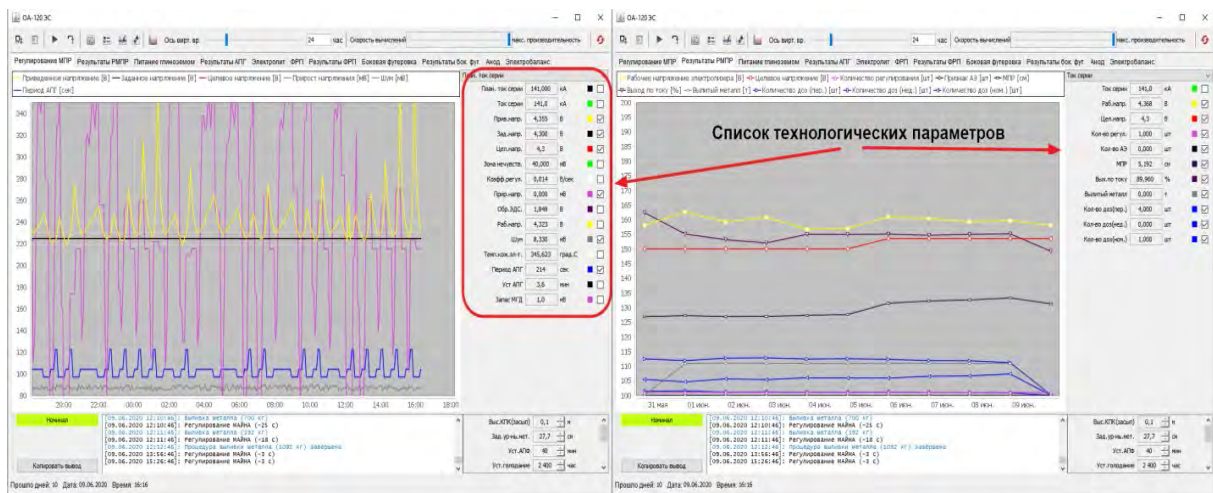


Рис.9. Основное окно программы, слева график параметров АСУТП, справа среднесуточные значения за наработанный виртуальный период

Рассмотрим имитацию важного технологического события (нарушения) Анодный Эффект (АЭ) – рисунки 10-12. АЭ происходит в результате недостатка глинозема в электролите и выражается в десятикратном повышении напряжения на электролизере (желтая линия на рис.10). При имитации был установлен запрет питания глиноземом, в 19 часов виртуального времени (синяя линия стала ноль). Далее происходили сбои работы системы автоматической подачи глинозема (та же синяя линия), пока все не восстановилось в 2 часа виртуального времени. На рисунке 10 представлено окно управления, идентичное интерфейсу и графикам, которые видит технолог на верхнем уровне настоящего АСУТП. Рисунки 11 и 12 имитируют параметры, которые в реальности измеряются раз в сутки, вручную, либо не измеряются вообще.

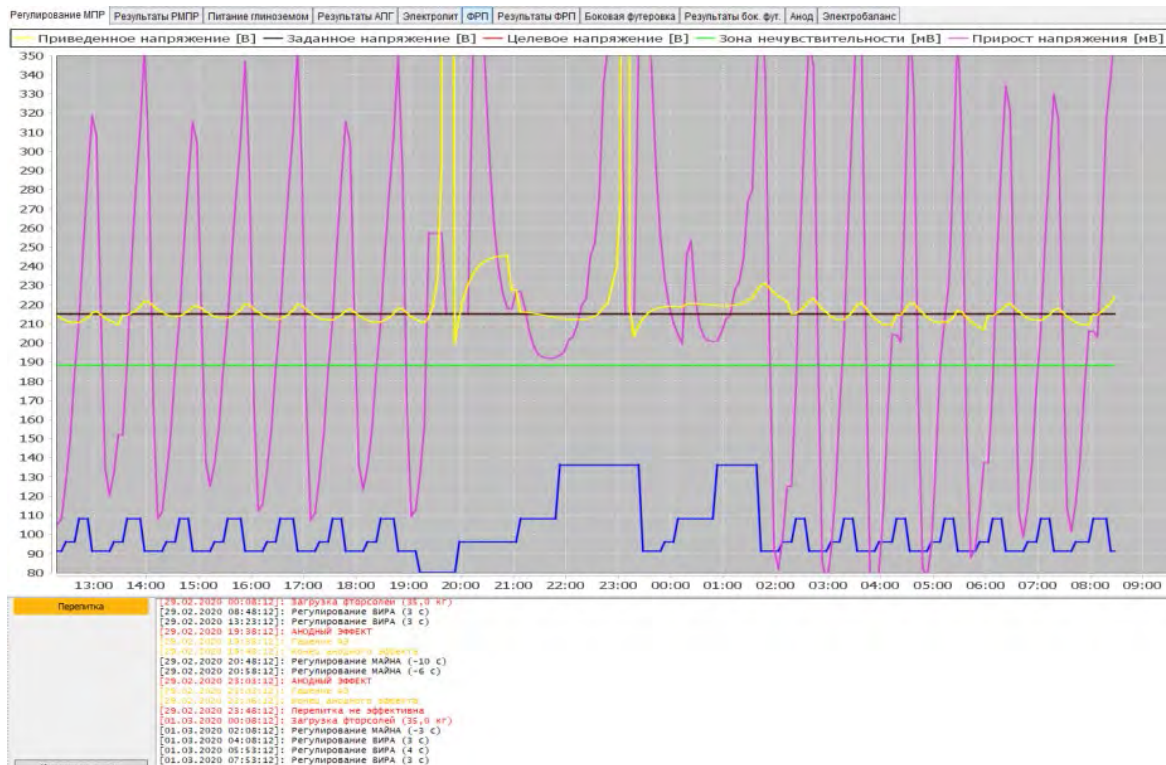


Рис. 10. Визуализация работы алгоритмов АСУТП при АЭ

На рисунке 11 белая линия это концентрация глинозема в электролите. Когда она достигает минимального значения, происходит АЭ. Гашение АЭ в программе «Виртуальный электролизер» выполняется имитацией добавки 100 кг глинозема. Это видно по росту концентрации глинозема с 20 и с 23 часов виртуального времени. Температура электролита при АЭ скачкообразно растет в связи с избытком тепла (красная линия на рис.11). Регулирование напряжения в момент АЭ и некоторое время после запрещено, поэтому междуполосное расстояние (темно-синяя линия) с 20 до 21 часа остается повышенным.

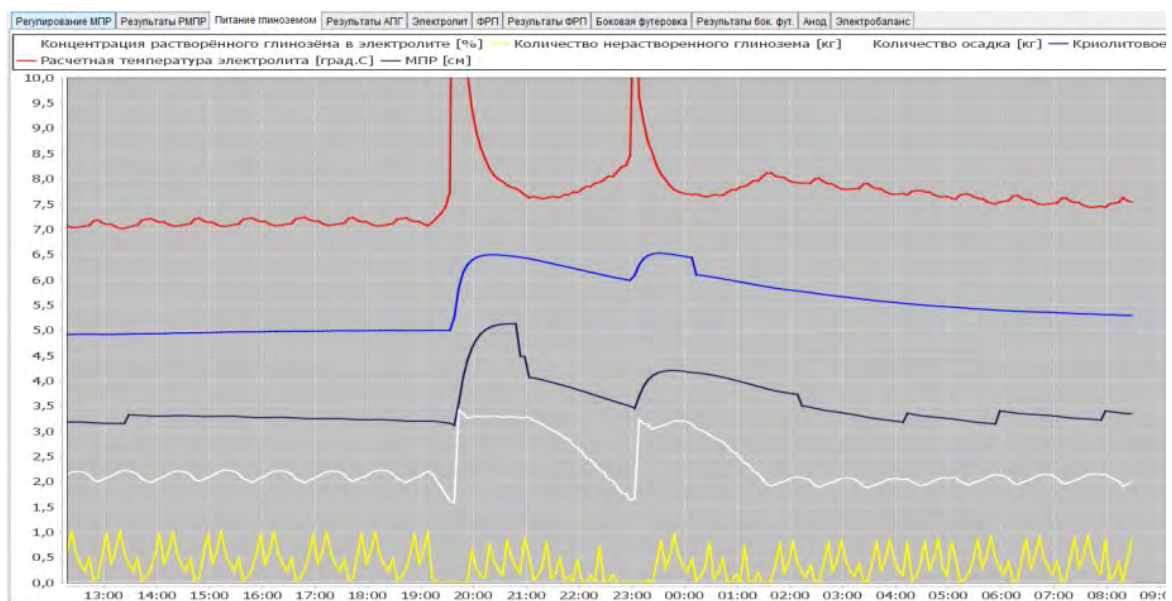


Рис. 11. Моделирование технологических параметров при АЭ

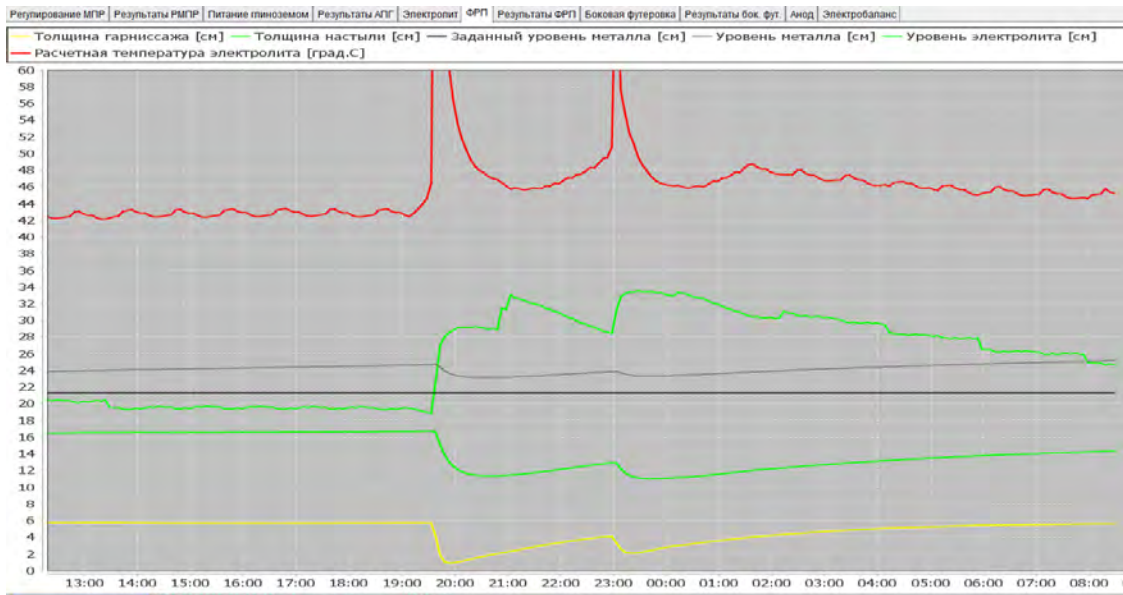
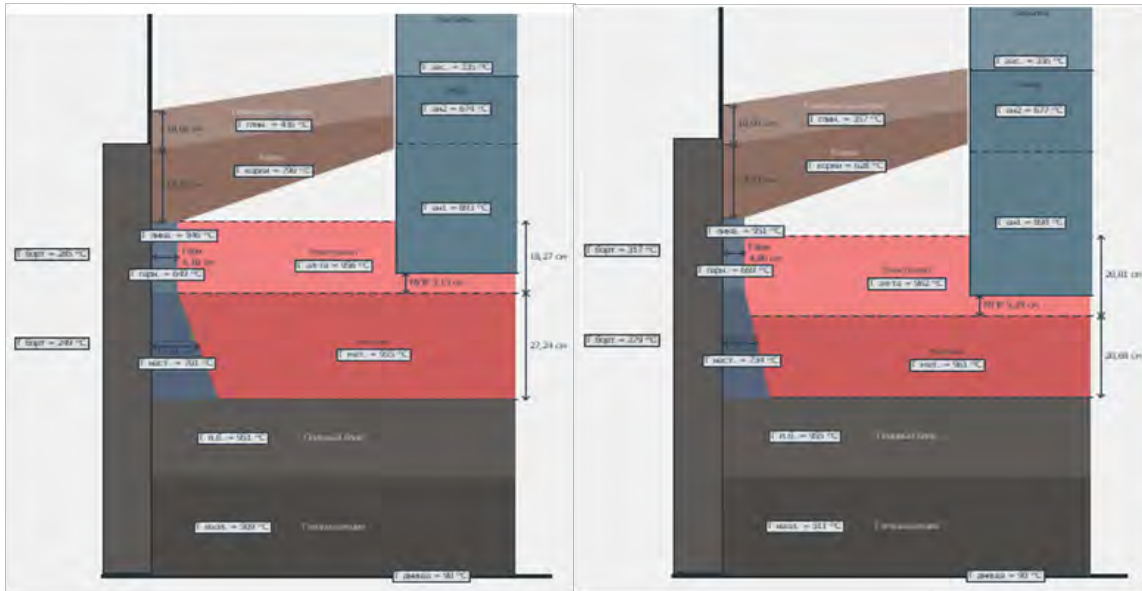


Рис. 12. Моделирование изменения толщин настыли и гарнисажа при АЭ

На рис. 12 видно расплавление настыли и гарнисажа вплоть до оголения борта (желтая линия в 20 часов) после АЭ.

На рисунке 13 представлен еще один вид графиков – имитация изменения параметров на разрезе электролизера. В настоящем АСУТП такая мнемосхема не используется, но для обучения технологам удобно сравнивать две ситуации таким образом. К рисунку 13 задавался вопрос при обучении – почему на правом разрезе температура расплава выше, чем на левом?

Рис.13. Сравнение двух технологических ситуаций
при помощи поперечных разрезов аппарата

В заключение хотелось бы представить работу блока оптимизации, задание целей и способов оптимизации представлено на рис. 14.

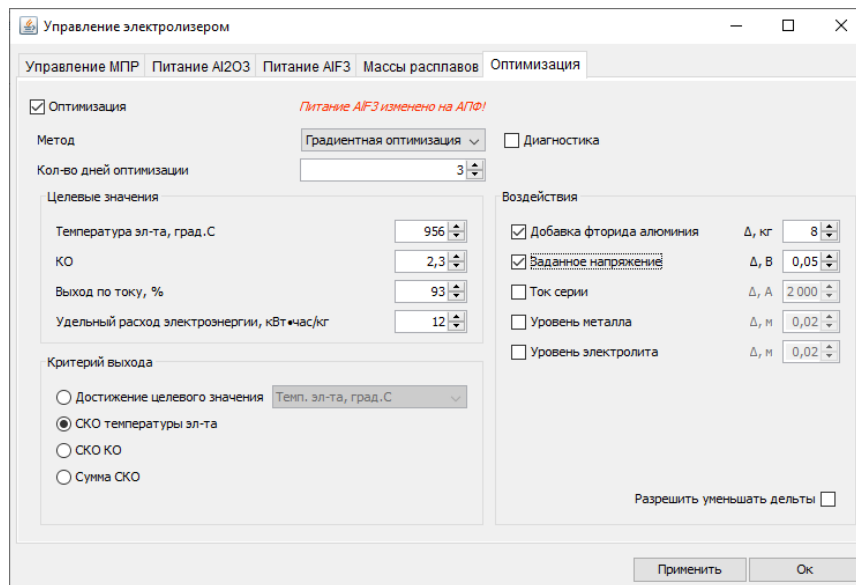


Рис. 14. Меню оптимизации

На рис. 15 справа представлен результат оптимизации – неправильная температура (красная линия) приведена в норму (фиолетовая линия); слева иллюстрация к работе алгоритма оптимизации, действия процедуры по выбору оптимальных воздействий.

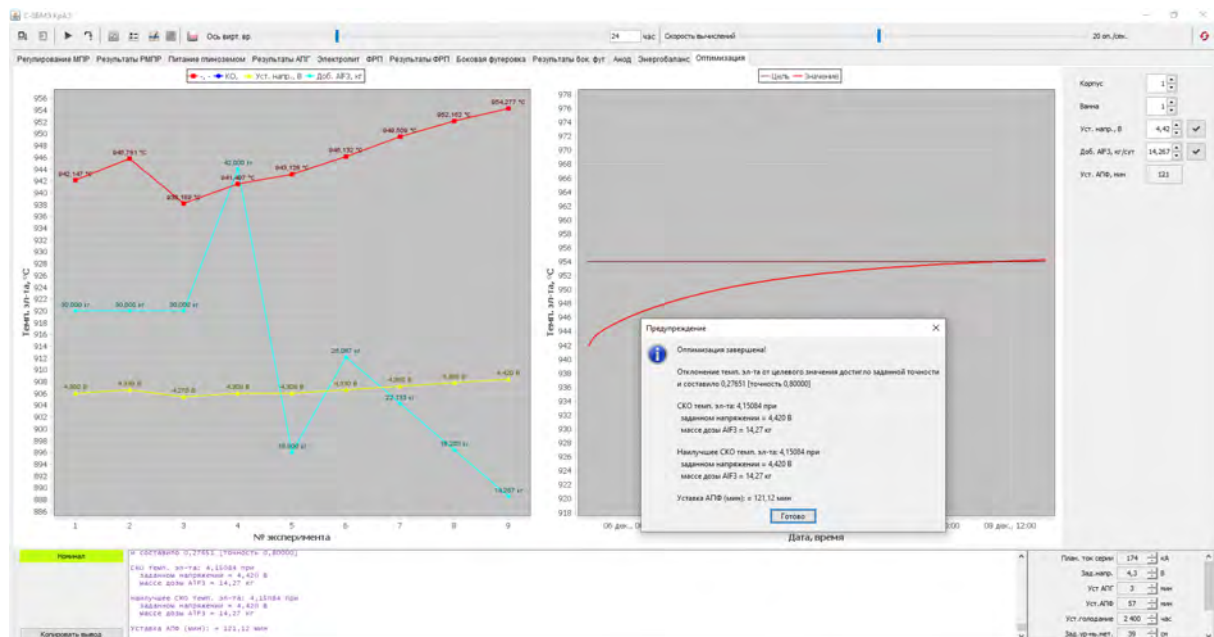


Рис. 15. Результат выбора программой задания по напряжению и по отдаче фтористого алюминия для приведения температуры расплава к цели

Заключение

Представлен материал об использовании имитационной модели «Виртуальный электролизер» и управляющих программ на ее основе на заводах компании РУСАЛ. Использование осуществляется по трем направлениям – обучение, алгоритмы автоматического управления процессом и консультационные расчеты. Внедрение имитационной модели в управление дало значительный экономический эффект, который частично отмечен в статье.

Литература

1. **Tang H.Q.** Response of a Hall- Heroult cell to step – changes in operating conditions measurements and dynamic simulations [Text] / H. Q. Tang, N. Urata, C. M. Read // *Light Metals*. – 1998. – P. 349-357.
2. **Stevens McFadden, F.J.** Application of advanced process control to aluminium reduction cell – a review [Text] / Fiona J. Stevens McFadden, P. B. Geoffrey, P. C. Austin, B. J. Welch // *Light Metals*. – 2002. – P. 1213-1220.
3. **Abdelhamid Meghlaoui** Real time simulator tool for training and development in reduction cell [Text] / Abdelhamid Meghlaoui, Yosef Ali Mohammed, Brian Jolly // *Light Metals*. – 1999. – P. 389-392.
4. **Potocnik V.** Multimedia for Training Pot Operators [Text] / V. Potocnik // *Industrial Aluminum Electrolysis*. – Quebec. – September 8–12, 2003.
5. **Barantsev A.G.** Model of Process of Electrolyses[Text] / A.G. Barantsev, V.V. Yurkov, V.C. Mann, T.V. Piskazhova, K.F. Nikandrov // *Light Metals*. – 2000. – P. 315.
6. **Yurkov V.** Virtual Aluminum Reduction Cell [Text] / V.V. Yurkov, V.Ch. Mann, T.V. Piskazhova, K.F. Nikandrov // *Light Metals*. – 2001. – P. 1259-1266.
7. **Yurkov V.** Dynamic Control of the Cryolite Ratio and the Bath Temperature of Aluminium Reduction Cell [Text] / V. Yurkov, V. Mann, T. Piskazhova, K. Nikandrov, O. Trebukh // *Light Metals*. – 2002. – P. 383-388.
8. **Piskazhova T.V.** The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model [Text] / T.V. Piskazhova, V.C. Mann // *JOM*. – Volume 58, Number 2. – February, 2006. – P. 48-52.
9. **Белолипецкий В.М.** Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия. Решение задач управления технологией. / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова. – Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2013. – 272 с. ISBN 978-5-7638-2619-7
10. Свидетельство № 2003612185 об официальной регистрации программы для ЭВМ. Стабилизация состава электролита на базе математической модели / В.Х. Манн, В.В. Юрков, Т.В. Пискажова, О.А. Требух, К.Ф. Никандров – зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ РФ 23.09.2003
11. Патент на изобретение RU 2730828 С1, опубликовано 26.08.20. Способ управления технологическим процессом в алюминиевом электролизере / Шайдулин Е.Р., Архипов Г.В., Пискажова Т.В.
12. Свидетельство №2017612828 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Учебно-консультационная программа «Виртуальный электролизер», версия 2.0. / Пискажова Т. В., Завадяк А. В., Пузанов И. И., Толкачев Н. М., Макеев А. В. – зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03 марта 2017 г.
13. **Haupin W.** Interpreting the Components of Cell Voltage [Text] / W. Haupin // *Light Metals*. – 1998. – P. 531-538.
14. **Tarcy G. P.** Current Efficiency Theory and Practices for Continuous Improvement [Text] / G. P. Tarcy // *TMS Industrial Aluminium Electrolysis*. – Quebec, Canada. – September, 2003. – P.12.
15. **Минцис М. Я.** Электрометаллургия алюминия [Текст] / М. Я. Минцис, П. В. Поляков, Г. А. Сиразутдинов. – Новосибирск: Наука, 2001. – 368 с.
16. **Bojarevics V.** Long wave instability in liquid metal-electrilyte interface in aluminium electrolysis cells: a generalization of Sele’s criterion [Text] / V. Bojarevics, M.V. Romerio // *European Journal of Mechanics. B/Fluids*. – 1994. – Vol. 13, N 1. – P. 33-56.
17. **Пискажова Т.В.** Способ оптимального управления химическим составом электролита при получении алюминия / Т.В. Пискажова // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева*. – 2010. – Вып. 3 (29). – С. 153-158.