

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АЛГОРИТМОВ АСУТП ЭЛЕКТРОЛИЗА АЛЮМИНИЯ

Т.В. Пискажова, В.Х. Манн *

Представленная в работе математическая модель предназначена для использования: в алгоритмах АСУТП электролиза алюминия, в учебно-консультационной программе “Виртуальный электролизер”. В статье приведена схема модели процесса электролиза, перечислены основные блоки, рассматривается применение упрощенных математических моделей теплообмена. Статья представляет также направления использования математической динамической модели электролизера на заводах компании “РУСАЛ” и в Инженерно – Технологическом центре. С помощью модели производится обучение персонала. При планируемых изменениях технологических параметров проводятся предварительные расчеты с целью выбора наилучшего регламента. Использование динамической модели непосредственно в алгоритмах управления электролизером для автоматического выбора оптимального управляющего воздействия также возможно и выгодно. “РУСАЛ” имеет длительный опыт использования программы стабилизации криолитового отношения на базе динамической модели. Показана экономическая эффективность, полученная при использовании этой программы.

На рис. 1 представлен поперечный разрез алюминиевого электролизера. 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. При прохождении тока через электролит из растворенного глинозема выделяется алюминий и оседает на катоде. Роль катода в электрохимическом процессе играет металл.

Основное назначение динамической модели - расчет и прогноз изменения технологических параметров процесса электролиза во времени, их комплексного отклика на воздействие. Изменения могут быть вызваны технологическими действиями персонала, работой системы управления, окружающей средой, сменой сырья.

Традиционно математическое моделирование при производстве алюминия использовалось для проектирования новых электролизеров. Однако в последние годы, с развитием компьютерных мощностей, математическое динамическое моделирование начинает применяться для управления процессом электролиза по следующим основным направлениям:

- использование динамической модели непосредственно в системе автоматического управления для оптимального выбора управляющего воздействия;
- посредством специального интерфейса модель используется как советчик или тренажер;
- разрабатываются сценарии управления на основе серии предварительных динамических расчетов.

Представленная в работе математическая модель предназначена для использования: в алгоритмах АСУТП электролиза алюминия, в учебно-консультационной программе “Виртуальный электролизер”. Цели обусловили математическую постановку задачи. Модель создавалась для “быстрых расчетов”. Несмотря на высокую скорость расчета, технологические расчеты и прогнозы имеют высокую достоверность. Модель обеспечивает выполнение законов сохранения энергии и массы в виртуальном электролизере и построена на обыкновенных дифференциальных и балансовых уравнениях. Структура, основные расчетные блоки и ма-

* © Т.В. Пискажова, В.Х. Манн, ООО Инженерно-технологический центр, 2006, piskajova@etc.rusal.ru

тематические уравнения динамической модели (динамического имитатора) были описаны в работах [1 – 7]. Автором работы [8] отмечены еще 4 известных динамических имитатора в различных компаниях: Alcan (Tikasz, Bui and Potocnik, 1994; Potocnic et al, 1996; Fradet et al, 2001), Kaiser (Tang et al, 1998), Dubal (Meghlaoui et al, 1999), Commercial simulator DYNA/MARC (Tabsh, Dupuis and Gomes, 1996).

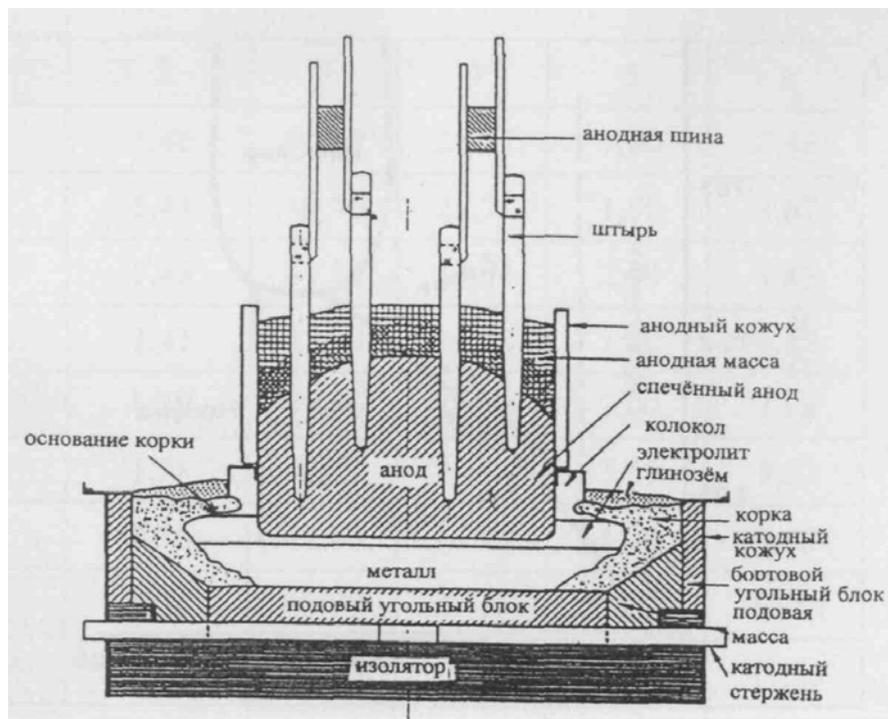


Рис. 1. Поперечный разрез алюминиевого электролизера

На рис. 2 представлены основные расчетные блоки динамической модели и порядок их взаимодействия. В настоящей работе будут показаны основные уравнения для расчета теплового баланса и изменения формы рабочего пространства (ФРП). Изменение формы рабочего пространства обусловлено плавлением или замерзанием электролита на боковых стенках ванны. Подробнее эти блоки представлены в [4], [5]. Методика расчета запаса магнито-гидродинамической стабильности, разработанная специально для динамической модели, была представлена в [7]. Модель растворения и потребления глинозема описывалась в [6]. Подробнее остановимся на методике тепловых расчетов. 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.

Каждый тепловой расчет, выполняемый моделью, можно разделить на два этапа:

- расчет стационарного распределения температур во всех слоях электролизера, толщин застывшего электролита для заданных начальных значений технологических параметров;
- расчет собственно динамики, т.е. изменения температур, толщин настыли и гарнисажа, тепловых потоков, электрических и химических параметров при управляющем воздействии.

На рис. 3 выделены области для расчета средних температур.

Уравнения теплового баланса составляются для средних температур в областях глинозема, корки, электролита, металла, катода и дна:

$$c_{\text{Э}} M_{\text{Э}} \cdot \frac{dT_{\text{Э}}}{dt} = Q_1 + Q_{\text{ан}} - Q_{\text{Э-Н}} - Q_{\text{Э-М}} - Q_{\text{г}} - Q_{\text{ре}} - Q_{\text{Э-кор}},$$

$$c_{\text{М}} M_{\text{М}} \cdot \frac{dT_{\text{М}}}{dt} = Q_{\text{Э-М}} - Q_{\text{М-Н}} - Q_{\text{М-к}},$$

$$c_{\text{Г}} M_{\text{Г}} \cdot \frac{dT_{\text{Г}}}{dt} = Q_{\text{кор-Г}} - Q_{\text{Г-ан}},$$

$$c_{\text{кор}} M_{\text{кор}} \cdot \frac{dT_{\text{кор}}}{dt} = Q_{\text{Э-кор}} - Q_{\text{кор-Г}},$$

$$c_k M_k \cdot \frac{dT_k}{dt} = Q_{M-k} - Q_{k-dn} + Q_{qk},$$

$$c_{dn} M_{dn} \cdot \frac{dT_{dn}}{dt} = Q_{k-dn} - Q_{dn-at}.$$



Рис. 2. Порядок взаимодействия основных блоков динамической модели

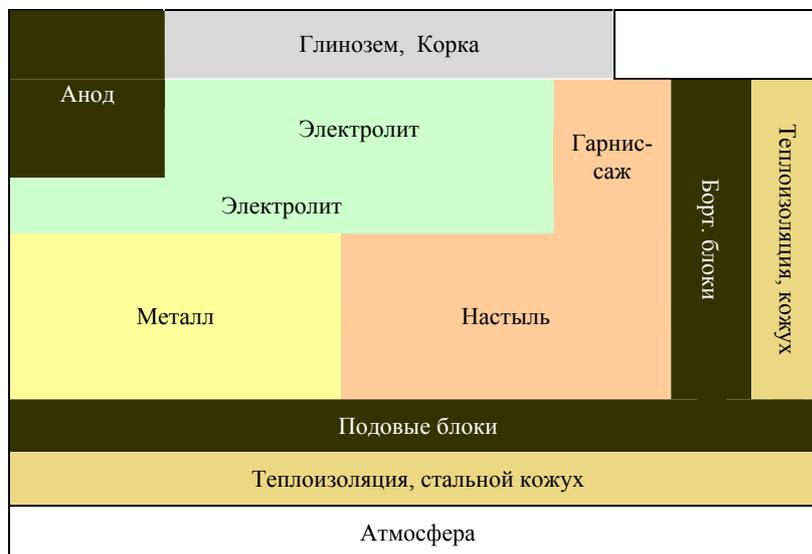


Рис. 3. Схематичное представление электролизера для тепловых расчетов

Здесь T_i - средние температуры соответствующих слоев, Q_1 - приход тепла от электроэнергии, $Q_{ан}$ - теплообмен с анодом, c_i - удельные теплоемкости соответствующих материалов, M_i - массы соответствующих областей, $Q_{Г}$ - потери тепла на нагрев глинозема, $Q_{рз}$ - потери тепла на растворение глинозема, $Q_{qк}$ - тепловой поток от внутреннего источника тепла в катоде.

Потоки тепла через границы определяются по формулам

$$Q_{э-н} = S_{э-н} \cdot \alpha_{э-н} (T_{э} - T_{лик}^э),$$

$$Q_{э-м} = S_{э-м} \cdot \kappa_{э-м} (T_{э} - T_m),$$

$$Q_{э-кор} = \lambda_{э} b_{э} S_{э-кор},$$

$$Q_{кор-Г} = S_{кор-Г} \cdot \kappa_{кор-Г} (T_{кор} - T_{Г}),$$

$$\begin{aligned}
 Q_{M-\kappa} &= S_{M-\kappa} \cdot \kappa_{M-\kappa} (T_M - T_\kappa), & Q_{M-n} &= S_{M-n} \cdot \alpha_{M-n} (T_M - T_{лик}^M), \\
 Q_{\Gamma-am} &= S_{\Gamma-am} \cdot \alpha_{\Gamma-am} (T_\Gamma|_{z=0} - T_{am}), & Q_{\kappa-dn} &= S_{\kappa-dn} \cdot \kappa_{\kappa-dn} (T_\kappa - T_{dn}), \\
 Q_{dn-am} &= S_{dn-am} \cdot \alpha_{dn-am} (T_{dn}|_{\Delta_{dn}} - T_{am}^{dn}).
 \end{aligned}$$

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

$$\kappa_{кор-\Gamma} = \frac{2}{\left(\frac{\Delta_{кор}}{\lambda_{кор}} + \frac{\Delta_\Gamma}{\lambda_\Gamma}\right)}, \quad \kappa_{\mathcal{E}-M} = \frac{2}{\left(\frac{\Delta_{\mathcal{E}}}{\lambda_{\mathcal{E}}} + \frac{\Delta_M}{\lambda_M}\right)}, \quad \kappa_{M-\kappa} = \frac{2}{\left(\frac{\Delta_\kappa}{\lambda_\kappa} + \frac{\Delta_M}{\lambda_M}\right)}, \quad \kappa_{\kappa-dn} = \frac{2}{\left(\frac{\Delta_\kappa}{\lambda_\kappa} + \frac{\Delta_{dn}}{\lambda_{dn}}\right)}.$$

Здесь $S_{\mathcal{E}-n}, S_{\mathcal{E}-M}, S_{\mathcal{E}-кор}, S_{M-n}, S_{M-\kappa}, S_{кор-\Gamma}, S_{\Gamma-am}, S_{\kappa-dn}, S_{dn-am}$ - площади соответствующих границ. Для оценки коэффициентов теплопередачи между горизонтальными слоями рассматривается стационарная задача теплообмена в вертикальном направлении. Используется стационарное приближение: $T_i = d_i + b_i z$, где $0 \leq z \leq \Delta z_i, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, Δz_i - высоты соответствующих областей, $i = 1 (\Gamma)$ - слой глинозема, $i = 2 (кор)$ - слой корки, $i = 3 (\mathcal{E})$ - слой электролита, $i = 4 (M)$ - слой металла, $i = 5 (\kappa)$ - слой катода, $i = 6 (dn)$ - дно. Произвольные постоянные b_i, d_i определяются из граничных условий равенства температур и потоков.

Подобные системы теплообмена выписываются для анода (или системы обожженных анодов) бортовой футеровки и настыли. Используется условие фазового перехода для определения толщины настыли

$$\rho_n L_n \frac{d\delta_4}{dt} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} - \alpha_{\mathcal{E}-n} (T_{\mathcal{E}} - T_{лик}).$$

Здесь ρ_n, L_n, λ_n - плотность, удельная теплота плавления, теплопроводность настыли.

δ_n - толщина настыли, $T_{\mathcal{E}}, T_{лик}$ - температуры электролита и ликвидуса.

Стационарное распределение температур находится совместным решением систем теплообмена с нулевой правой частью во всех областях (равенство входящих и выходящих потоков в статике).

Рассмотрим использование динамической модели электролизера в алгоритмах АСУТП. На базе модели в настоящее время на заводах компании функционируют две программы:

- учебно -консультационная программа “Виртуальный электролизер”, свидетельство о государственной регистрации № 2003610551, правообладатель ООО ИТЦ.
- программное обеспечение “Стабилизация состава электролита на базе математической модели”, свидетельство о государственной регистрации №2003612185, правообладатель ООО ИТЦ.

Программа “Виртуальный электролизер” установлена в учебных классах заводов и используется для повышения квалификации персонала. На рис. 4 представлен графический интерфейс программы с иллюстрацией влияния работы алгоритма АПП на температуру электролита, концентрацию глинозема, приведенное напряжение. Обучаемые могут произвести управляющие воздействия, соответствующие работе системы управления на реальном электролизере, попробовать различные настройки алгоритмов управления.

Также “Виртуальный электролизер” интенсивно используется для технологических расчетов. При планируемом изменении одних технологических параметров (например, увеличении тока, изменении уровня металла, состава электролита) технологи хотят знать:

- 1) как изменятся при этом другие технологические параметры,
- 2) какими сделать эти самые другие параметры, чтобы изменение прошло наиболее эффективно,
- 3) как изменится при этом расход сырья и электроэнергии,
- 4) какой сценарий изменений наилучший.

На рис. 5 представлен пример расчета прогноза среднесуточных значений температуры электролита и криолитового отношения при увеличении тока с помощью программы “Виртуальный электролизер”. Подробно об опыте и методике такой работы рассказывается в [9], [10].

В качестве примера рассмотрим расчеты прогнозов изменения технологических параметров при поднятии тока на Красноярском алюминиевом заводе и использование рассчитанных регламентов. Была поставлена задача – оценить влияние различных регламентов изменения технологических переменных при поднятии тока на выход по току и на расход энергии. Проводились пробные расчеты различных воздействий: поднятие тока и снижение напряжения, поднятие тока и закисление электролита, поднятие тока и повышение уровня металла и другие сочетания повышения силы тока для электролизеров С-8БМ. В табл. 1 показаны последствия увеличения силы тока и компенсирующих воздействий на температуру электролита и криолитовое отношение (КО). Рассмотрены четыре варианта воздействий при одинаковых начальных условиях.

В варианте №1 ток увеличили на 2 кА, компенсирующих добавок не производили. Температура электролита увеличилась на 3 градуса, КО на 0,03. Остальные параметры поддерживали постоянными. Расчетная оценка выхода по току снизилась на 0.5%. В варианте №2 после увеличения тока на 2 кА заданное напряжение снизили на 50 мВ. Температура электролита и КО сохранились, оценка выхода по току снизилась на 0.3%. В варианте №3 после увеличения тока при неизменном заданном напряжении увеличили добавку фторида алюминия AlF_3 на 10 кг ежесуточно в течение 12 дней. Выход по току увеличился на 0,1%. В варианте №4 после увеличения тока на 2 кА уровень металла подняли на 4 см. При этом температура электролита, КО, перегрев вернулись к первоначальным значениям. Выход по току не снизился.

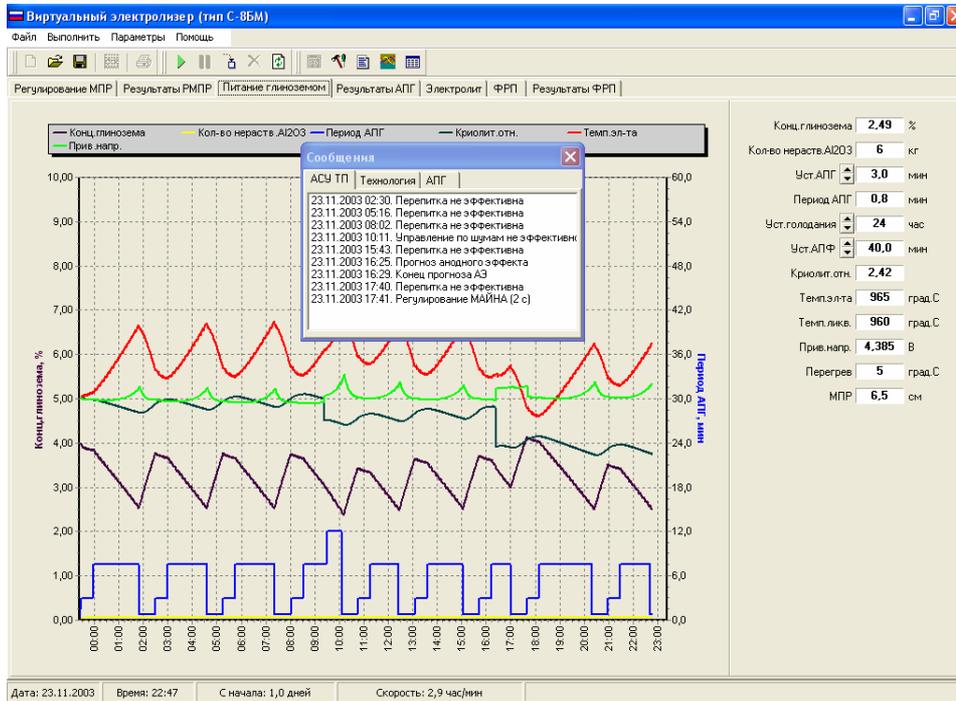


Рис. 4. Демонстрация влияния работы алгоритма АПГ на температуру электролита, концентрацию глинозема, приведенное напряжение



Рис. 5. Расчеты среднесуточных значений технологических параметров при повышении тока от 165 кА до 170 кА, снижении заданного напряжения от 4,35 до 4,33, увеличении суточной добавки фторида алюминия

Таблица 1

Параметры	Начальные условия	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3	Вариант №4
Сила тока, кА	160	162	162	162	162
Заданное напряжение, В	4,3	4,3	4,25	4,3	4,3
Температура электролита, град	958	961	958	958	958
КО	2,4	2,43	2,4	2,35	2,4
Уровень металла, см	50	50	50	50	54
Компенсирующая разовая добавка AlF_3 , кг	0	0	0	120	0
Оценка выхода по току, %	88	87,5	87,7	88,1	88

При заданном графике поднятия тока для электролизеров ОА - 120 мы подбирали регламент изменения технологических параметров, обеспечивающий неизменность перегрева и ФРП. При этом расход энергии не должен был увеличиться.

Для расчетов увеличения силы тока были взяты следующие стартовые условия: ток серии 125.9 кА, напряжение электролизера 4.26 В, КО 2.33, %CaF₂ 6.2, %Al₂O₃ 2.5, температура электролита 958°C, высота электролита 22 см, высота металла 24 см. При этом получилось: толщина гарнисажа 8 см, средняя толщина настыли 26 см. Средняя температура стального кожуха 180°C, средняя температура днища 74°C, масса электролита - 5,6 тонны, масса металла 11 тонн.

На наш взгляд, наилучшим был регламент с одновременным снижением заданного напряжения, некоторым подъемом уровня металла, значительным снижением КО.

Сопоставление некоторых расчетных и фактических значений приведено на рис. 6. Как видно, температура электролита поддерживалась в соответствии с рассчитанным регламентом, кроме апреля. В апреле - мае значительно ухудшилось качество анодных блоков, значительно увеличился выход пены, что разогрело электролит. В феврале - марте поступал глинозем плохого качества, что сказалось на увеличении числа анодных эффектов и повышении напряжения несколько выше расчетного. Как видно из графиков, уровень металла был весь период несколько выше расчетного, что тоже требовало дополнительного тепла. Не всегда фактическое КО соответствовало рекомендуемому графику. Слишком сильное снижение КО в феврале привело к увеличению настыли в феврале-марте. Нашими расчетами предсказывалось увеличение толщины настыли в этот период, но не столь значительное. Тем не менее, в целом можно отметить хорошее совпадение фактических и регламентных значений технологических параметров. Это подтверждает возможность использования ПО «Виртуальный электролизер» для прогнозов теплового баланса.

Расчеты, проведенные с использованием ПО «Виртуальный электролизер», и корректная работа технологий с этими расчетами позволили сохранить тепловой баланс электролизеров при увеличении силы тока [9].

Программа «Стабилизация состава электролита на базе математической модели» нужна для одной цели – стабилизации криолитового отношения, но при этом является предметом ежедневного промышленного использования.

Основное отличие ПО «Стабилизация состава электролита на базе динамической модели» от аналогичных программ для корректировки КО – использование встроенного динамического имитатора для расчета прогноза КО и оптимального выбора суточной дозы сырья AlF_3 .

Необходимость расчета прогноза КО обусловлена двумя факторами:

- зависимостью изменений КО от изменений теплового баланса ванны;
- инерционностью КО.

Например, если повышали напряжение, то повысится температура электролита, как следствие, КО повысится тоже, и мы должны отреагировать на это увеличением подачи AlF_3 . Последствия увеличенной отдачи AlF_3 , изменений напряжения сказываются полностью через 3-7 дней.

Для расчетов программа использует набор технологических переменных за неделю, предшествующую дню прогноза: уровни расплавов, среднесуточное напряжение электролизера, ток серии, количество анодных эффектов, добавки фторида алюминия.

Программа должна ликвидировать разницу между прогнозом КО на сегодняшний день и целевым КО в течение трех дней: сегодня, завтра, послезавтра. Сделать это она должна максимально быстро, но в рамках ограничений на суточную добавку AlF_3 . С учетом сложившегося динамического состояния электролизера на момент прогноза оптимизационная процедура осуществляет выбор массы загружаемого фторида алюминия и распределяет эту массу на три дня. Используется метод двумерного градиента с наискорейшим спуском.

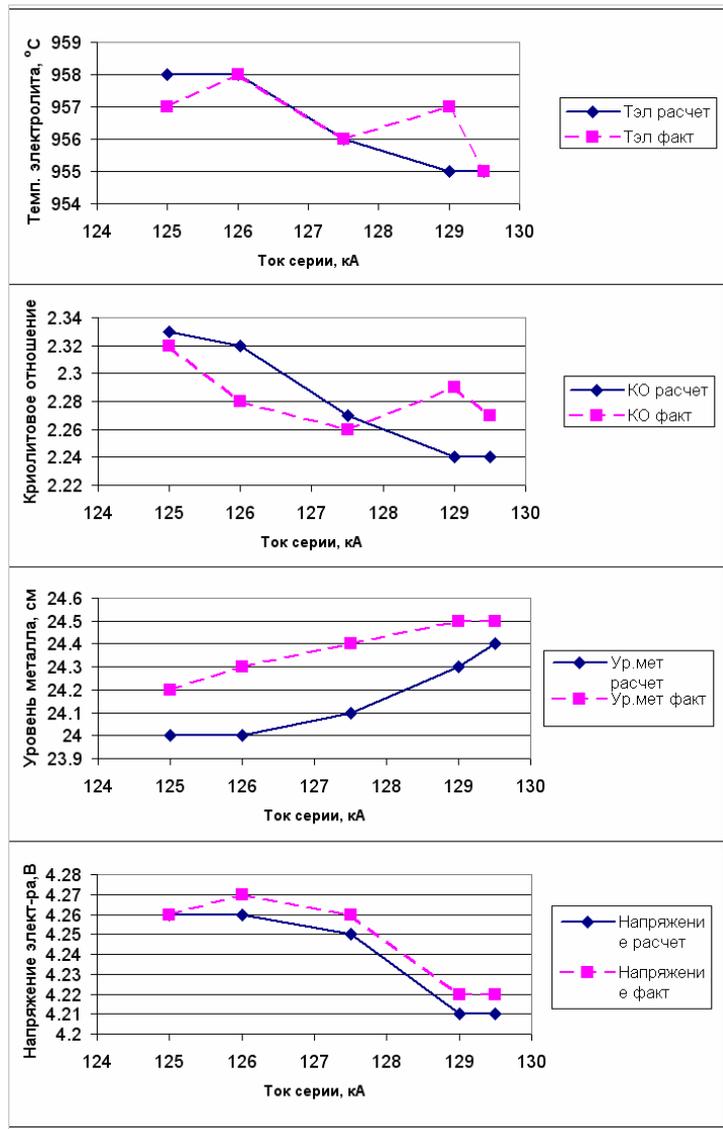


Рис. 6. Сравнение значений технологических параметров, рассчитанных по регламенту и фактически полученных для каждой ступени поднятия тока

Подробнее о самой программе и о полученных результатах сообщается в [3]. Хорошие результаты при промышленном внедрении программы подтверждаются снижением числа отклонений. На рис. 7 представлено характерное снижение среднеквадратичного отклонения КО от заданного при внедрении в корпусе данной программы с октября.

В результате использования этой программы в промышленных масштабах был получен значительный экономический эффект от снижения удельного расхода AlF_3 . Статистически подтвержденная экономия составляет 0,8 кг AlF_3 на тонну алюминия. Эта цифра получена сравнением расходных коэффициентов корпусов, использующих эту программу, и контрольных корпусов. Сравнивались представительные группы корпусов в течение длительного времени [3]. По отдельным корпусам экономия в течение длительного периода достигала 3 кг/т.

Кроме того, при использовании программы снижается число отклонений, процесс становится стабильнее. Прямой эффект от этого оценить сложнее, чем в первом случае. На сегодняшний день программа осуществляет ежедневный автоматический расчет добавок AlF_3 в 21 корпусе Красноярского алюминиевого завода, в 2 корпусах Саяногорского алюминиевого завода, в 11 корпусах Новокузнецкого алюминиевого завода. На КрАЗе программа находится в промышленной эксплуатации около 3,5 лет. Эффективность использования постоянно подтверждается, так же как и при внедрении на других заводах.

Как показывает анализ материалов открытой печати, широкое промышленное использование динамических моделей при получении алюминия не имеет прецедентов, поэтому авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие результаты: компания РУСАЛ первая имеет опыт эффективного промышленного использования программ для управления технологией на базе динамической модели.

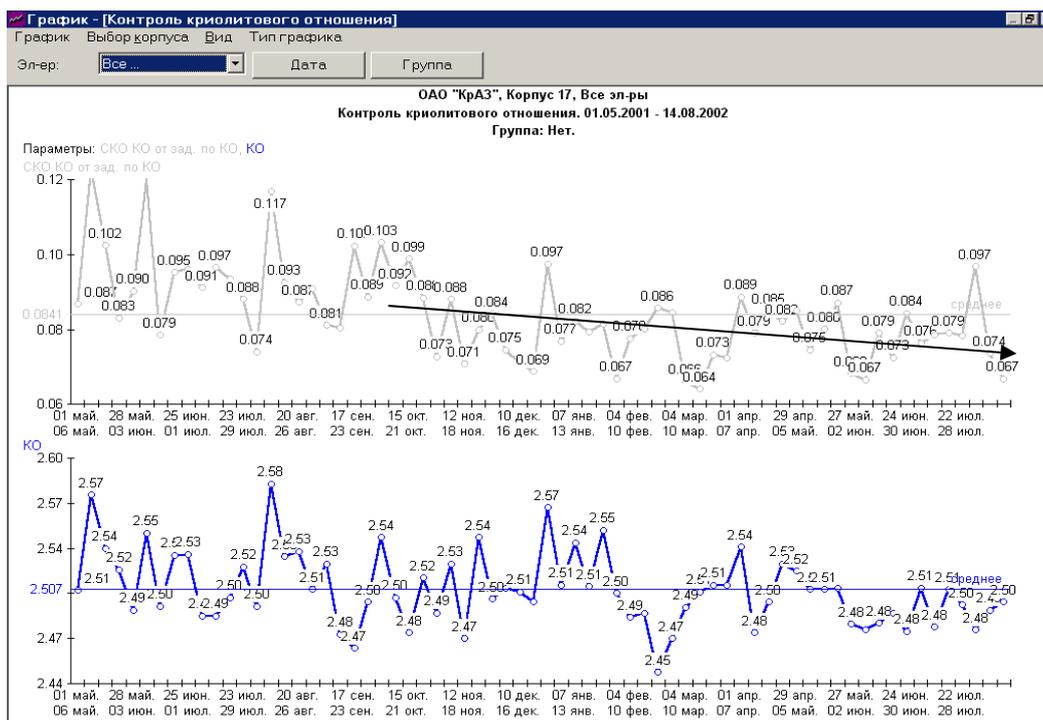


Рис. 7. Снижение СКО КО при внедрении программы в одном корпусе

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barantsev A.G., Yurkov V.V., Mann V.C., Piskazhova T.V., Nikandrov K.F. Model of Process of Electrolyses // Light Metals - 2000, - P.315
2. Yurkov V.V., Mann V.C., Piskazhova T.V., Nikandrov K.F. Virtual Aluminum Reduction Cell // Light Metals - 2001, - P.1259.
3. Пискажова Т.В., Манн В.Х., Юрков В.В., Никандров К.Ф., Требух О.А. Виртуальный электролизер и его практическое применение на ОАО КрАЗ // Алюминий Сибири – 2002. – Красноярск. - С. 60-65.
4. Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В. Упрощенная компьютерная модель динамики настлы виртуального электролизера // Вычислительные технологии - 2003, Т.8, №6, - С. 22-28.
5. Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В. Многослойная математическая модель теплового баланса виртуального электролизера // Вычислительные технологии - 2004, Т.9 (Вестник КАЗНУ им. Аль-Фараби) - С. 295-299.
6. Berezin 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, - P. 151-156.
7. 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.-матем. науки, Красноярск, 2005, Вып 3, - С. 118-124.
8. Vinko Potocnik Multimedia for Training Pot Operators // Industrial Aluminum Electrolysis. - September 8-12, Quebec, 2003.
9. 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 – 2003. – Красноярск. - С. 132-136.
10. Berezin A.I., Polyakov P.V., Rodnov O.O., Stont P.D., Piskajova T.V., Criterial Parameters in Evaluation of Cell’s Potentialities for Computerized Control // Light Metals –2004, - P. 257-263.

DYNAMIC MODEL FOR ALUMINIUM ELECTROLYSES PROCESS CONTROL SYSTEM ALGORITHMS.

T.V. Piskazhova., V.H. Mann

The schema of model is presented in this paper, key blocs are listed, application of the simplified mathematical heat exchange models is considered. Article represents also directions of use mathematical dynamic cell model at smelters of company RUSAL and Engineering-Technology Center.