

## Содержание

### Экономика и управление производством

<i>Международный обзор рынка цветных металлов</i> .....	6
---------------------------------------------------------	---

### Обогащение

Иванова Т. А., Чантурия В. А., Зимбовский И. Г., Копорулина Е. В. Цветовая идентификация комплексных соединений флотационных собирателей с металлами в растворах и на минеральной поверхности .....	8
Лапшин Д. А., Простакишин М. Ф., Золотарев В. Н., Воложанинов А. Б. Разработка технологии переработки руд Удоканского месторождения. Часть 3. Полупромышленные испытания технологической схемы .....	17
Егоров А. М., Лаврентьев А. В., Сарычев Г. А., Тананаев И. Г. Технология флотационного обогащения концентратов при переработке отвалов Завитинского литиево-бериллиевого месторождения .....	23

### Тяжелые цветные металлы

Федосеев И. В., Баркан М. Ш. Совершенствование гидрометаллургической переработки сульфидных медно-никелевых промпродуктов .....	27
Матюхин В. И., Ярошенко Ю. Г., Матюхин О. В., Булатов К. В. Совершенствование тепловой работы шахтных печей при реконструкции воздухоподачи. Часть 1 .....	33

### Легкие металлы, углеродные материалы

Сысов И. А., Кондратьев В. В., Шахрай С. Г., Карлина А. И. Разработка способа управления энергетическим режимом электролизеров для производства алюминия .....	38
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### Редкие металлы, полупроводники

Гасанов А. А., Семенов А. А., Апанасенко В. В., Юрасова О. В. Расчет полного противоточного экстракционного каскада с обменной промывкой с использованием Excel .....	44
Алекберов З. М., Матясова В. Е., Коцарь М. Л., Быков А. Д. Исследования распределения бериллия по продуктам плавки медно-бериллиевой лигатуры производства ФГУП «Базальт» .....	50

### Композиционные материалы и многофункциональные покрытия

Богданович В. И., Марьин С. Б., Докукина И. А., Гиорбелидзе М. Г. Разработка состава покрытий и оборудования для восстановления и упрочнения деталей энергетических агрегатов методом плазменного напыления .....	56
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### Материаловедение

Кашапов О. С., Павлова Т. В., Кондратьева А. Р., Калашников В. С. Особенности применения жаропрочного титанового сплава ВТ8-1 для моноколес компрессора газотурбинных двигателей .....	63
Горунов А. И. Изучение влияния термической обработки на структуру и свойства образцов, получаемых методом прямого лазерного нанесения .....	69

### Металлообработка

Мочалин И. В., Горохов Ю. В., Беляев С. В., Губанов И. Ю. Экструдирование медных шин на установке «Колформ» с форкамерой .....	75
Якушин Б. Ф., Бакуло А. В., Шиганов И. Н. Повышение свариваемости термоупрочненных алюминиевых сплавов .....	79

### Автоматизация

Бринза В. В., Филонов М. Р., Логинова В. В., Аникин Ю. А. Анализ и наукометрическое прогнозирование исследований и разработок термоэлектрических материалов .....	85
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### Хроника

К 110-летию Алексея Борисовича Логинова. И. С. Аристов .....	93
<b>ЛАЙНЕР Юрий Абрамович</b> .....	43
***	
Требования к оформлению статей .....	4

*Журнал включен в Международные базы данных Scopus, Chemical Abstracts Service*

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ без самоцитирования (2014) ..... 0,194

*Журнал по решению ВАК Минобрнауки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по разработке месторождений твердых полезных ископаемых, по металлургии, по экономике, по химии.*

*Статьи всех авторов, в том числе аспирантов, публикуются в порядке общей очереди бесплатно (за исключением статей рекламного характера).*

## Разработка способа управления энергетическим режимом электролизеров для производства алюминия

В порядке обсуждения

УДК 621.879

**И. А. Сысоев**, ведущий науч. сотр. отдела инновационных технологий<sup>1</sup>

**В. В. Кондратьев**, начальник отдела инновационных технологий<sup>1</sup>

**С. Г. Шахрай**, доцент, каф. теплообменной безопасности горного и металлургического производства<sup>2</sup>, эл. почта: shahrai56@mail.ru

**А. И. Карлина**, зам. начальника управления научной деятельности<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт, ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.

<sup>2</sup> ФГАОУ ВПО Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Приведен краткий обзор возможных подходов к регулированию энергетического режима электролизеров и состава электролита; выполнен их анализ. Отмечены достоинства и недостатки разных способов, используемых в мировой практике. Выявлено, что важнейшим фактором, определяющим достижение высоких технико-экономических показателей электролитического получения алюминия, являются правильно подобранная температура электролита и значение его перегрева. На основании изученных материалов определены способы разработки маноматричного и эффективного метода управления энергетическим режимом работы электролизера. Выполнены эксперименты, результаты которых позволили вывести формулу для расчета температуры ликвидуса электролита. Проведены исследования влияния различных факторов на температурные характеристики электролитов при производстве алюминия. Цель работы заключалась в определении оптимальных параметров и создании алгоритма управления энергетическим режимом электролизеров путем контроля и автоматического поддержания в заданных пределах рабочего напряжения и температур электролита. На основании созданного алгоритма управления была разработана компьютерная программа и проведены ее промышленные испытания на действующем производстве. Результаты работы можно использовать при разработке и внедрении технологии автоматизированного управления электролизерами для получения алюминия.

**Ключевые слова:** электролизер, алюминий, температура электролита, напряжение, ток, электроэнергия, управление энергетическим режимом.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.17580/tsm.2016.05.06>

### Введение

В России одним из основных потребителей электроэнергии является алюминиевая промышленность, выпускающая порядка 4 млн т/год металла, на производство которого затрачивается более 60 млрд кВт·ч электроэнергии, что практически равно суммарной годовой выработке Красноярской, Братской и Саяно-Шушенской ГЭС, являющихся самыми мощными электростанциями не только в России, но и в мире. В целом мировая алюминиевая промышленность выпускает более 40 млн т/год металла, расходуя при этом 3,5 % мирового производства электроэнергии [1]. Поэтому в современных условиях в связи с ужесточением на государственном уровне требований к энерго- и ресурсосбережению [2] исследования с целью создания энергосберегающей технологии получения алюминия приобретают особую актуальность.

Одной из главных составляющих энергоэффективности процесса электролиза алюминия является пра-

вильно подобранная температура электролита и значение его перегрева. Перегрев электролита ( $T_{SH}$ ) определяют как разность рабочей температуры электролита ( $T_{EL}$ ) и температуры ликвидуса ( $T_L$ ) или его кристаллизации:

$$T_{SH} = T_{EL} - T_L.$$

Температура электролита и температура ликвидуса, определяемая избыточным содержанием фторида алюминия  $AlF_3$  в электролите, влияют на важнейший экономический показатель электролизера — выход по току. В отечественной практике вместо избытка  $AlF_3$  применяют обратный параметр — молекулярное (криолитовое) отношение (КО)  $NaF/AlF_3$ . По данным работы [3], снижение температуры электролита на 1 °С приводит к повышению выхода по току на электролизерах с обожженными анодами на 0,19 %, на электролизерах Содерберга — на 0,17 %. Увеличение избытка  $AlF_3$  в электролите на 1 % (снижение КО примерно на 0,05) вызывает возрастание выхода по току на электролизе-

рах с обожженными анодами на 0,56 %, а на электролизерах Содерберга — 1,35 %. Оптимальная температура электролита, при которой выход по току максимален, — 950 °С. Значение оптимального избытка  $AlF_3$  в работе [3] не указано.

Повышение избытка  $AlF_3$  в электролите (снижение КО) ограничено возможностями стабилизации теплоэнергетического режима. Показателем, характеризующим стабильность теплоэнергетического режима электролизера, является эффективный перегрев электролита. Температура ликвидуса электролита определяется его химическим составом, и в первую очередь избытком  $AlF_3$  [4]. Перегрев электролита является важным параметром электролиза, определяющим скорость растворения глинозема в электролите [5], а также влияющим на размер боковых настывей и, как следствие, на теплообмен электролизера с окружающей средой, так как тепловые потери через боковую настывь составляют ~35 % от всех тепловых потерь электролизера [6].

Обобщая известные сведения, можно утверждать, что для получения максимального выхода по току необходимо поддерживать температуру электролита ~950 °С и обеспечивать его перегрев в диапазоне 8–12 °С при максимально возможном избытке  $AlF_3$  (минимально возможное КО). Таким образом, стабилизация рабочей температуры и перегрева электролита является важнейшим фактором, определяющим достижение высоких технико-экономических показателей работы электролизера.

#### Известные способы управления энергетическим режимом электролизера

В мировой практике для контроля и управления энергетическим режимом электролизера используют разные подходы. Одни основаны на поддержании необходимых криолитового отношения и концентраций  $MgF_2$  и  $CaF_2$  [7]. Другие регулируют содержание фтористого алюминия в электролите, используя алгоритм, основанный на принципе «нечеткой логики» [8].

В компании Reshiney для управления энергорезимом электролизера разработано устройство автоматического измерения температуры и уровня электролита [9], которое требует постоянного обслуживания вследствие налипания на него электролита.

За рубежом для управления энергетическим режимом используют программу «9 box» (Heraeus Electro-Nite), опыт применения которой представлен в работе [10]. Авторы сообщают, что внедрение данной технологии управления привело к увеличению выхода по току на 1 %, снижению расхода электроэнергии на 0,6 кВт·ч/кг алюминия [10]. Ключевым моментом использования программы «9 box» является определение температуры ликвидуса и перегрева с помощью высокоточных одноразовых термодатчиков Cry-O-Therm.

Считается, что при помощи указанного измерительного комплекса можно достоверно и оперативно определять температуру расплава и ликвидуса. Однако главным недостатком системы является высокая стоимость термодатчиков, что препятствует серийному применению данного метода на российских алюминиевых заводах [11].

В настоящее время компания Heraeus Electro-Nite презентовала измерительную систему FiberLab™. Принцип работы этой системы основан на оценке интенсивности излучения, проходящего по расходуемому оптоволоконному кабелю от источника света, которым является электролит, в определенном диапазоне длин волн. Результатом измерения являются температура электролита, температура ликвидуса, перегрев, содержание  $AlF_3$  (расчет) и концентрация  $Al_2O_3$  (оценочный расчет). По информации производителя, результаты измерений хорошо коррелируют с результатом анализа методом рентгеновской дифрактометрии [12].

Одной из новинок среди систем измерений для управления энергорезимом электролизера является STARprobe™ (Alcoa). Важной особенностью этого измерительного комплекса является определение не только рабочей температуры и перегрева электролита, но и концентрации глинозема, наряду с «кислотностью» ванны. Авторы отмечают высокую воспроизводимость результатов измерений в сравнении с методом рентгеновской дифрактометрии [13]. В работе [14] представлены аналитические материалы, полученные по результатам эксплуатации измерительного комплекса в течение длительного времени на трех заводах компании Alcoa. Таким образом, можно утверждать, что система STARprobe™ является перспективным, но все же дорогостоящим измерительным комплексом.

В настоящее время на большинстве российских алюминиевых заводов управление энергорезимом сводится к корректировке химического состава электролита с целью поддержания заданного криолитового отношения. На некоторых заводах разрабатывали и внедряли программы управления на основе сведений о химическом составе электролита и температуре ликвидуса. Так, например, известна программа управления, основанная на регулярных измерениях температуры ликвидуса электролита прибором МИТЭЛИК. За основу алгоритма управления принята концепция применения «нечеткой логики» [15].

Известны случаи, когда для управления энергетическим режимом используют определение температуры ликвидуса расчетным способом на основании результатов химического анализа электролита. Так, некоторые исследователи с использованием многофакторного регрессионного анализа предложили уравнения расчета температуры ликвидуса, что позволяет при известной температуре электролита определить температуру перегрева [15]. Основным недостатком этого метода

заключается в том, что в связи с отличием типов конструкций электролизеров, их технических характеристик и степени влияния технологических факторов требуется индивидуальный подход.

**Исследовательская часть**

Авторами данной работы была поставлена задача разработать алгоритм управления энергетическим режимом электролизера, основанный на эмпирическом способе определения температуры ликвидуса и концентрации глинозема, с использованием предварительно построенной калибровочной зависимости физических параметров криолит-глиноземного расплава [17–19].

В ходе исследований определяли степень влияния на температуры (рабочую, ликвидуса и перегрева) электролита технологических факторов: режимов работы системы автоматической подачи глинозема (АПГ), варьирования рабочего напряжения, анодных эффектов, а также операций «выливка металла» и «замена анодов».

Для проведения опытов с варьированием рабочего напряжения были выбраны четыре электролизера, работающих при силе тока 300 кА. Изменение рабочего напряжения электролизера в сторону как повышения, так и понижения проводили в два этапа в соответствии с последовательностью

Изменение напряжения, мВ	+80	+160	-60	-120
Число операций электролизеров, шт.	2	2	2	2

Динамика изменения температуры электролита и перегрева от рабочего напряжения представлена на рис. 1.

Было установлено, что при отработанном алгоритме работы АПГ для электролизера характерны узкие пределы колебаний температуры перегрева 5–6 °С. При увеличении напряжения на 100 мВ температура электролита повышается на 7,9 °С, а перегрев — на 5,1 °С. При снижении напряжения на 100 мВ температура электролита уменьшается на 9,2 °С, а перегрева — на 3,5 °С.

Согласно результатам оценки влияния анодных эффектов, температура ликвидуса резко снижается после гашения и подачи дополнительных порций глинозема. Температура электролита, напротив, возвращается к своему исходному значению в течение 2 ч. При возникновении анодного эффекта температура электролита  $T_{El}$  возвращается к исходному значению в течение 2,5–3,0 ч, температура ликвидуса  $T$  — 0,5–1,5 ч (в зависимости от исходного перегрева электролита).

При замене анодов время возврата температур к первоначальному уровню существенно разнится и составляет от 2 до 5 ч, что обусловлено различными технологическими факторами: попаданием корки в электролит при извлечении из электролизера огарка, режимом работы АПГ («насыщение» или «голодание»),

формой рабочего пространства, временем замены анода и его выхода на полную нагрузку. При замене анодов диапазон колебаний температур ликвидуса составлял от 5–20 °С, электролита — от 2–13 °С. Оценка влияния операции «выливка металла» на температуру электролита и ликвидуса показала, что эта технологическая операция на структуру температур электролита существенного влияния не оказывает.

В дальнейшем результаты экспериментов были использованы в алгоритме программы управления энергетическим режимом электролизеров в качестве расчетных коэффициентов [20].

Разработанный алгоритм программы [21] базируется на следующих принципах:

- управление химической композицией электролита с помощью автоматизированных систем подачи фтористого алюминия и глинозема;
- управление тепловым режимом электролизера путем регулирования рабочего напряжения с ежедневными измерениями рабочей температуры электролита;
- определение температуры ликвидуса, перегрева и концентрации глинозема расчетным способом с использованием эмпирической зависимости, учитывающей данные о химическом составе проб электролита.

Задачей программы является определение степени воздействия на электролизер и выдача рекомендаций для приведения рабочей температуры электролита

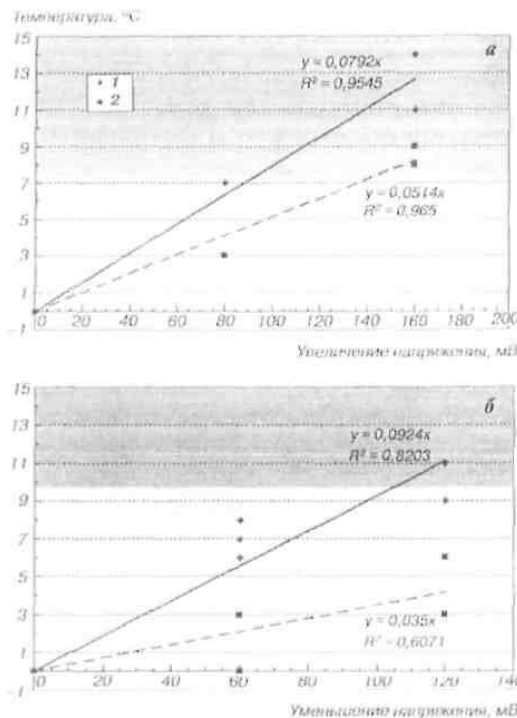


Рис. 1. Изменение температуры электролита (1) и температуры перегрева (2) при увеличении (а) и уменьшении (б) рабочего напряжения

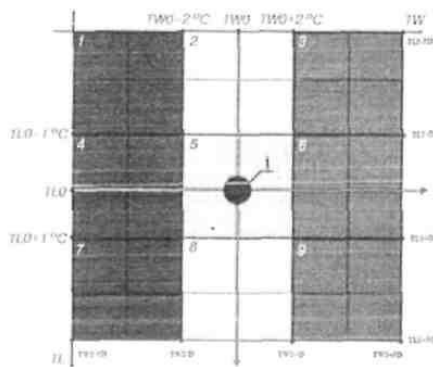


Рис. 2. Графическая схема матрицы для управления энергорежимом электролизера



Рис. 3. Рабочее окно программы управления энергорежимом электролизера (картинка с экрана монитора)

и перегрева к целевым значениям. Расчеты в программе осуществляются на основе матрицы из 36 блоков, каждому из которых соответствует определенный диапазон температур (рис. 2). При этом управляющее воздействие различается по степени удаления фактических значений (результатов измерений) от целевых параметров (центральная точка матрицы).

Особенностью данной программы является то, что выбор целевых значений рабочей температуры и ликвидуса происходит каждый раз при анализе пробы электролита на химический состав. Таким образом, чем чаще проводят отбор проб, тем с большей долей вероятности исключен фактор негативного влияния внезапного изменения концентрации химических компонентов электролита, которые могут искажать выбранные целевые значения рабочей температуры и ликвидуса.

Для удобства использования алгоритма в условиях действующего производства было получено авторское свидетельство на программу ЭВМ «Перегрев» [21]. Преимуществом алгоритма является нео-

граниченная база данных и возможность его оперативной модификации. На рис. 3 представлена «форма» для ввода измеренных значений рабочей температуры и результатов химического анализа электролита.

Первые испытания программы управления энергорежимом в течение 3 мес на двух опытных электролизерах показали положительные результаты. Было установлено, что применение программы управления помогло оптимизировать форму рабочей поверхности и обеспечить оптимальные тепловые параметры опытных электролизеров: наличие гарниссажа достаточной толщины (~5 см), кругопадающий профиль настыва и приемлемую температуру бортовой стенки катодного кожуха, не превышающую 350 °С, уменьшить расход фтористого алюминия до 5 кг/т алюминия, снизить рабочее напряжение на 100 мВ и уменьшить удельный расход электроэнергии на 100–200 кВт·ч/т алюминия-сырца.

## Заключение

В связи с тем, что на российских алюминиевых заводах для определения криолитового отношения электролита, а также содержания фтористого кальция и магния используют дорогостоящий лабораторный анализ проб электролита, определение температуры ликвидуса и концентрации глинозема расчетным способом является малозатратным механизмом управления энергетическим режимом электролизера. Программа ЭВМ, разработанная на основе алгоритма управления, позволяет контролировать температурный режим и химическую композицию электролита и, как следствие, увеличить технико-экономические показатели процесса электролиза. Результаты работы можно использовать в условиях действующего производства при разработке и внедрении технологий автоматизированного управления электролизера для получения алюминия различных типов конструкции, а также при технико-экономическом обосновании строительства новых производственных мощностей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахрай С. Г., Белянин А. В., Кондратьев В. В. Повышение энергетической эффективности электролитического производства алюминия // Сб. докл. VI междунар. конгресса «Цветные металлы-2014», Красноярск, 15–18 сент. 2014. С. 361–372.
2. Федеральный закон № 261-ФЗ РФ. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : принят Гос. Думой 11.11.2009 г.
3. Tarcy G. P., Torklep K. Current Efficient in Prebake and Soderberg // Light Metals. 2005. Vol. 2. P. 319–334.
4. Solheim A., Rolseth S., Skybakmoen E., Stoen L., Sterten E., Store T. Liquidus temperature and alumina solubility in the system  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{AlF}_3 - \text{LiF} - \text{CaF}_2 - \text{MgF}_2$  // Light Metals. 1995. Vol. 2. P. 451–460.
5. Михалева Ю. Г., Браславский А. Б., Исаева Л. А. Влияние криолитового отношения, перегрева электролита и добавок фторида кальция на скорость растворения глинозема // Сб. докл. XI междунар. конф. «Алюминий Сибири», Красноярск. 2005. С. 6–8.