

Содержание

Экономика и управление производством	
<i>Международный обзор рынка цветных металлов</i>	6
Разработки сотрудников Навоийского горно-металлургического комбината	
Поздравляем с наградой К. С. Санакулова!	2-я стр. обложки
Санакулов К. С., Мустакимов О. М., Эргашев У. А., Ахатов Н. А. О целесообразности применения комбинированных технологий для переработки особо упорных золотосульфидных руд	9
Музафаров А. М., Ослоповский С. А., Саттаров Г. С. Радиометрические исследования техногенных объектов	15
Исмагилов М. М., Хужакулов Н. Б., Гафуров К. Исследование пространственно-объемного распределения золота в лежалых хвостах ГМЗ-З	20
Музафаров А. М., Василенок О. П., Нарбадалов Ш. И., Саттаров Г. С. Оценка возможности использования некондиционных вод в гидрометаллургическом производстве	27
Обогащение	
Малышев В. П., Бектурганов Н. С., Макашева А. М., Зубрина Ю. С. Вероятностная модель измельчения материалов как оператор самоорганизации и аттрактор процесса	33
Тяжелые цветные металлы	
Теляков Н. М., Дарьин А. А., Теляков А. Н., Петухов А. А. Влияние специфики состава железомарганцевых конкреций Тихого океана и Балтийского моря на технологические показатели извлечения ценных компонентов	40
Благородные металлы и их сплавы	
Бобоев Ф. Ш., Бобоев И. Р., Стрижко Л. С., Рябова А. В. Совершенствование практики кучного выщелачивания золота в суровых климатических условиях	46
Легкие металлы, углеродные материалы	
Шахрай С. Г., Скуратов А. П., Кондратьев В. В., Ершов В. А. Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера	52
Таланов А. А., Коцарь М. Л., Коншин Р. С., Киверин В. Л. Процессы дистилляции кальция в модернизированном оборудовании увеличенной производительности	57
Редкие металлы, полупроводники	
Копкова Е. К., Муждабаева М. А., Громов П. Б., Кузнецов В. Я. Низкотемпературное неводное разложение пирохлора органическим растворителем	62
Гуро В. П., Юсулов Ф. М., Сафаров Е. Т., Рахматжариева Ф. Г. Выбор оптимального связующего для гранулирования молибденитового концентрата	68
Блохин А. А., Плешков М. А., Мурашкин Ю. В., Шнеерсон Я. М. Оценка возможности применения некоторых слабоосновных анионитов для конверсии вольфрамата натрия в вольфрамат аммония	74
Композиционные материалы и многофункциональные покрытия	
Ракоч А. Г., Стрекалина Д. М., Гладкова А. А. Износостойкие покрытия на титановом сплаве ВТ6, получаемые методом плазменно-электролитического оксидирования	80
Бабкин В. Г., Терентьев Н. А., Чубарова Н. Е. Армирующие лигатуры для производства термически неупрочняемых композиционных сплавов на основе алюминия	85
Металлообработка	
Кондратьев Д. А., Ковалевский А. В. Сплавообразование при диффузионном насыщении никеля и кобальта неодимом в расплаве LiCl – KCl – NdCl ₃	92
Наши юбиляры	
РЮМИНУ Александру Александровичу — 60 лет.	5

Журнал включен в международные базы данных Scopus, Chemical Abstracts Service

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ без самоцитирования 0,155

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).

Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера

УДК 669.713.7.66.012.32

С. Г. Шахрай, доцент, каф. технологической безопасности горного и металлургического производства¹,

эл. почта: shahrai56@mail.ru

А. П. Скуратов, профессор¹

В. В. Кондратьев, доцент²

В. А. Ершов, доцент²

¹ ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

² Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск, Россия.

Представлен краткий обзор способов охлаждения анодных газов, используемых на современных алюминиевых заводах, с целью снижения их физических объемов, сокращения энергозатрат на транспортировку и уменьшения габаритов газоходных сетей, подавления десорбции фтора с горячего глинозема, уловленного газоочистными установками.

Кратко рассмотрены современные методы использования теплоты анодных газов на хозяйственные и производственные нужды — получение горячей воды с ее дальнейшей дистилляцией или направлением на выработку электроэнергии в машинах Ранкина.

Выполнен анализ затрат энергии на нагрев загружаемого в ванну глинозема до температуры расплава, а также потерь теплоты с анодными газами, удаляемыми от электролизера с самообжигающимся анодом. Показано, что вместе с уносимыми в систему газоотсоса высокоэнthalпийными анодными газами теряется энергия, количество которой в 3–4 раза превышает затраты теплоты на нагрев глинозема до температуры расплава.

С помощью уравнений теплообмена в областях электролита и глинозема показано преимущество загрузки в ванну предварительно нагретого глинозема.

Разработано и представлено техническое решение, обеспечивающее использование теплоты анодных газов на нагрев глинозема до 200–250 °С перед его загрузкой в расплав. Загрузка в расплав нагретого глинозема снижает удельный расход электроэнергии электролизером на 80–95 кВт·ч/т Al, энергозатраты на транспортировку охлажденных анодных газов сократятся на 15–20 кВт·ч/т Al, одновременно снизится материалоемкость газоходных сетей корпусов производства алюминия, эксплуатирующих электролизеры с самообжигающимся анодом. Нагрев глинозема по предлагаемому техническому решению обеспечивает практически 2-кратное сокращение числа эксплуатируемых бункеров системы автоматической подачи глинозема, уменьшает нагрузку на домкраты анодной рамы и потребление энергии их приводами, улучшает условия формирования самообжигающегося анода.

Ключевые слова: энергосбережение, анодные газы, теплота, нагрев глинозема, утилизация, самообжигающийся анод, анодная рама.

DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/tsm.2016.02.08>

Введение

Более половины потребляемой электролизером энергии рассеивается в окружающую среду в виде тепла. При этом с анодными газами, удаляемыми в систему организованного газоотсоса, от электролизеров с обожженным анодом уносится 12,5 % тепла [1], от электролизеров с самообжигающимся анодом — до 3 % [2]. Исследования зарубежных специалистов в области энергоресурсосбережения в течение последних лет направлены преимущественно на сокращение энергозатрат на транспортировку анодных газов, объем удаления которых от современных серий электролизера может достигать 3–4 млн м³/ч [3]. При этом предлагают различные способы решения проблемы: «впрыск» воды в транспортируемый газовый поток перед его входом в газоочистные установки [4], охлаждение газов в кожухотрубных и пластинчатых теплообменни-

ках с последующим использованием нагретой воды на хозяйственные или производственные нужды (получение дистиллированной воды или производство электроэнергии в машинах Ранкина) [5–9], охлаждение газов с помощью теплоотводящих шпилек, размещенных по наружной поверхности газоходов [10]. Охлажденные таким образом газы имеют меньшие физические объемы и вязкость. Энергозатраты для их транспортировки ниже, кроме того, требуются менее габаритные газоходные сети и газоочистные установки.

Однако, как правило, алюминиевые заводы, в состав которых входят анодные производства, не испытывают дефицита горячей воды и пара на хозяйственные и производственные нужды. А в летнее время, напротив, имеет место проблема реализации избытков тепла, утилизируемого от печей прокаливания кокса и анодов. Поэтому более целесообразным, на взгляд авторов, представляется использование тепла анодных газов

на нагрев глинозема перед его загрузкой в электролит, что существенно увеличит скорость его растворения в расплаве и снизит риск образования осадков на подине [11].

Математическая модель нагрева загружаемого в электролизер глинозема

Скорость растворения глинозема в криолитовом расплаве является функцией большого числа переменных, зависящих от свойств глинозема, температуры и состава электролита, способа питания и конструкции ванны. Одна часть глинозема растворяется практически мгновенно, другая — образует агломераты и растворяется медленнее. Так как температура загружаемого глинозема (амногого ниже температуры криолитового расплава, агломераты покрываются корочкой застывшего электролита, прогрев и растворение которой происходит по истечении времени [12]. Наибольшее влияние на скорость полного растворения глинозема оказывает температура электролита. Согласно работам [11, 13], увеличение температуры электролита на 10 °С, с 950 до 960 °С, сопровождается ростом скорости растворения глинозема в 1,7–2,0 раза, нагрев глинозема от 28 до 550 °С увеличивает скорость растворения глинозема в 2 раза.

При средней удельной теплоемкости глинозема 780 Дж/(кг·К) на его нагрев от 20 до 950–960 °С электролизер расходует ~1,5·10⁶ кДж/т Al тепла. На восполнение этих затрат расходуются 400–420 кВт·ч электроэнергии (~2,5 % ее общего потребления электролизером с самообжигающимся анодом).

Теплообмен в областях электролита и глинозема описывается уравнениями относительно средних температур [14]:

$$C_э M_э (d\hat{T}_э / dt) = Q_1 + Q_{ан} - Q_{э-н} - Q_{э-м} - Q_г - Q_p - Q_{э-кор}, \quad (1)$$

$$C_г M_г (d\hat{T}_г / dt) = Q_{кор-г} - Q_{г-ат}, \quad (2)$$

$$Q_{кор-г} = S_{кор-г} \cdot k_{кор-г} (\hat{T}_{кор} - \hat{T}_г), \quad (3)$$

$$Q_{г-ат} = S_{г-ат} \alpha_{г-ат} (T_{г,z=0} - T_{ат}), \quad (4)$$

$$k_{кор-г} = \frac{2}{\left(\frac{\Delta_{кор}}{\lambda_{кор}} + \frac{\Delta_г}{\lambda_г} \right)}, \quad (5)$$

где Q_1 — приход тепла от электроэнергии в электролите; $Q_{ан}$ — теплообмен с анодом; $Q_{э-н}$ — тепловой поток из электролита в настель; $Q_г$ — потери тепла на нагрев и растворение глинозема; Q_p — расход тепла на основную реакцию; $Q_{э-кор}$ — тепловой поток из электролита в корку; $Q_{кор-г}$ — тепловой поток от корки к глинозему на корке; $Q_{г-ат}$ — тепловой поток из глинозема в атмосферу; $M_э$ и $M_г$ — массы электролита и загружаемого в расплав глинозема соответственно;

$C_э$ и $C_г$ — теплоемкости электролита и глинозема соответственно; $\hat{T}_э$, $\hat{T}_г$, $\hat{T}_{кор}$, $T_{ат}$ и $T_{г,z=0}$ — средние температуры электролита, растворенного в расплаве глинозема, корки, атмосферного воздуха над коркой и поверхности глинозема соответственно; $S_{кор-г}$ и $S_{г-ат}$ — площади границ «корка – глинозем» и «глинозем – атмосфера» соответственно; $k_{кор-г}$ — коэффициент теплопередачи от корки к глинозему; $\alpha_{г-ат}$ — коэффициент теплоотдачи от глинозема в атмосферу; $\Delta_{кор}$ и $\Delta_г$ — высоты слоя корки и загружаемого глинозема соответственно; $\lambda_{кор}$ и $\lambda_г$ — коэффициенты теплопроводности корки и глинозема соответственно.

Анализ уравнений (1)–(5) показывает, что загрузка предварительно нагретого глинозема снижает высоту его слоя на корке вследствие более высокой скорости растворения, увеличивает теплоотдачу от корки к глинозему и сокращает, таким образом, затраты энергии на нагрев до температуры расплава загружаемого в электролизер оксида алюминия.

Нагрев глинозема анодными газами электролизера с самообжигающимся анодом

Одним из источников тепла для нагрева глинозема при производстве алюминия в электролизерах с самообжигающимся анодом может стать теплота анодных газов, удаляемых в систему газоотсоса. Количество теплоты, выделяющейся за счет сгорания анода и термемой с отходящими газами, определяют термодинамическими расчетами, представленными в работах [15, 16]. Тепловой эффект сгорания углерода (анода) в процессе электролиза определяют из зависимости:

$$Q_{ан} = P_{CO_2} \Delta H_T^{CO_2} + P_{CO} \Delta H_T^{CO}; \quad (6)$$

количество теплоты, уносимой от электролизера с анодными газами:

$$Q_{газ} = P_{CO_2} \Delta H_{T_2CO_2}^{T_1} + P_{CO} \Delta H_{T_2CO}^{T_1}, \quad (7)$$

где P_{CO_2} и P_{CO} — масса образующихся в электролизере CO_2 и CO , кг/ч; ΔH_T^{CO} и $\Delta H_T^{CO_2}$ — теплоты реакций (8) и (9) соответственно, кДж/кг; $\Delta H_{T_2CO_2}^{T_1}$ и $\Delta H_{T_2CO}^{T_1}$ — изменение теплосодержания CO_2 и CO в интервале температур от T_2 до T_1 , кДж/кг.

При этом протекают реакции:



В общей сложности в систему газоотсоса высокоэнthalпийные анодные газы уносят (3,6–4,0)·10⁶ кДж/т Al тепла, что в 3–4 раза превышает затраты теплоты на нагрев глинозема до температуры расплава [2]. Использование этой энергии в производстве способно существенно повысить энергетическую эффективность

электролиза и снизить расход электроэнергии, что согласуется с политикой ведущих стран мира в области энергоресурсосбережения и требованиями российского законодательства в этом направлении [17].

Для нагрева глинозема целесообразно использовать противоточный теплообменник, кожухотрубный или пластинчатый, попутно выполняющий роль бункера системы автоматической подачи глинозема (АПГ), в котором охлаждаемые газы движутся в трубах (платинах), а нагреваемый глинозем — в межтрубном пространстве [18].

Для этого бункер-теплообменник системы АПГ целесообразно установить не на анодном кожухе, как это практикуется в настоящее время (рис. 1), а вне электролизера таким образом, чтобы обеспечить возможность подачи нагретого глинозема на два смежных электролизера (рис. 2).

При этом указанное устройство должно быть установлено на высоте, обеспечивающей наклон труб подачи нагретого глинозема в электролизер под углом, превышающим естественный откос, т. е. не менее 45° . Рекомендуемый объем бункера-теплообменника — $1,5 \text{ м}^3$, что равно вместимости двух бункеров системы АПГ, эксплуатируемых в настоящее время. Благодаря этому обеспечивается возможность загрузки в устрой-



Рис. 1. Электролизеры с самообжигающимся анодом, оборудованные системой АПГ

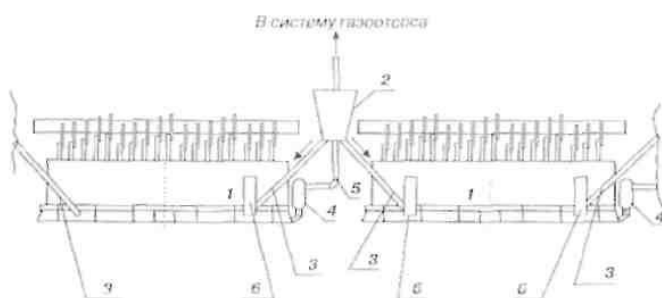


Рис. 2. Схема размещения бункера АПГ и движения анодных газов (от горелочного устройства) в систему газоотсоса:
1 — электролизер; 2 — бункер-теплообменник системы АПГ; 3 — трубы подачи нагретого глинозема в электролизер; 4 — горелочное устройство электролизера; 5 — газосборный колокол; 6 — пробойник системы АПГ

ство до 3 т глинозема, достаточных для питания смежных электролизеров в течение 2–3 сут. Утилизация в теплообменнике 10–15 % тепла, уносимого в систему газоотсоса, обеспечит нагрев глинозема до $200\text{--}250^\circ\text{C}$, а его загрузка в электролизер уменьшит потребление электроэнергии на $80\text{--}95 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т Al}$. Ограничение количества утилизируемого тепла обусловлено необходимостью поддержания температуры газов на выходе из теплообменника на уровне $80\text{--}100^\circ\text{C}$ с целью предотвращения конденсации паров смолистых веществ, не сгоревших в горелках, и их осаждения на стенки теплообменника.

В целях снижения тепловых потерь бункером в окружающую среду, а также уменьшения теплового потока от нагретого глинозема в атмосферу поверхности теплообменника целесообразно изолировать, а загрузку нагретого глинозема в электролизер осуществлять непосредственно под газосборный колокол (ГСК) через секцию, оборудованную камерой сбора фторидов, образующихся в результате испарения и гидролиза фтористых солей (рис. 3) [19].

Охлаждение анодных газов в теплообменнике до $250\text{--}300^\circ\text{C}$ уменьшает их объем в 2,0–2,5 раза, а также вязкость и статическое давление на стенки газоходов. Энергетические затраты на эвакуацию охлажденных таким образом газов на 25–30 % ниже, чем при их отводе традиционным способом (из горелки непосредственно в систему газоотсоса). Для их транспортировки требуются менее материалоемкие газоходные сети уменьшенных диаметров. Ориентировочные расчеты показывают, что удельные энергозатраты на транспортировку охлажденных газов на $15\text{--}20 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т Al}$ ниже, а материалоемкость газоходной сети корпуса электролизера в этом случае сокращается на 12–15 т.

К другим преимуществам представленного решения следует отнести уменьшение числа устанавливаемых бункеров практически в 2 раза: в масштабах корпуса электролиза, эксплуатирующего 88 электролизеров, — с 352 до 192 единиц. Расположение предложенных устройств не на анодном кожухе позволяет сократить

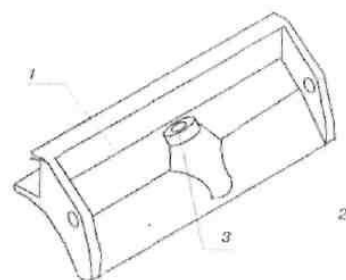


Рис. 3. Секция газосборного колокола с камерой сбора фторидов, образующихся при загрузке сырья в расплав:
1 — стенка ГСК; 2 — камера сбора фторидов; 3 — отверстие ввода сырья в расплав

нагрузку на домкраты анодной рамы на 6–8 т, снизить потребление электроэнергии их приводами на 15–20 % (на 2,0–2,5 кВт·ч/т Al), а также, что немаловажно, экономить средства на их изготовление и обслуживание.

Кроме того, обеспечивается экранирование и увеличивается отвод тепла анодным устройством. Это обеспечивает более равномерное распределение температур в зоне жидкой анодной массы и положительно сказывается на формировании самообжигающегося анода — снижаются образования «шеек» анода и протечи жидкого пекла в подколлекторное пространство, что в целом повышает экологические показатели электролизера.

Заключение

1. На основе анализа уравнений теплообмена в областях электролита и глинозема разработано и предложено техническое решение, обеспечивающее утилизацию теплоты высокоинтенсивных анодных газов, удаляемых от электролизера в систему организованного газоотсоса. Использование этой теплоты на нагрев глинозема обеспечит суммарное снижение удельного расхода электроэнергии на 105–135 кВт·ч/т Al, что эквивалентно увеличению выхода по току на 0,6–0,8 %.

2. Для транспортировки анодных газов, охлажденных в теплообменниках-бункерах до 200–250 °С, требуются газоходные сети со сниженной материалоемкостью.

3. Использование бункеров-теплообменников в соответствии с предложенным техническим решением позволяет сократить число эксплуатируемых бункеров почти в 2 раза: в масштабах корпуса электролиза, эксплуатирующего 88 электролизеров, — с 352 до 192 единиц.

4. Удаление бункеров с анодного кожуха обеспечивает снижение нагрузки на домкраты анодной рамы на 6–8 т и создание более благоприятных условий формирования самообжигающегося анода, что положительно сказывается на экологических показателях электролизера.

Статья подготовлена с использованием результатов работ, выполненных в ходе проекта 02.G25.31.0161 «Разработка сверхмощной, энергоэффективной технологии получения алюминия РА-550» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Янко Э. А. Производство алюминия. Пособие для мастеров и рабочих цехов электролиза алюминиевых заводов. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2007. — 305 с.
2. Шахрай С. Г., Коростовенко В. В., Баранов А. Н. и др. Анализ влияния повышения силы и плотности анодного тока на показатели работы электролизера Содерберга // Третий междунар. конгресс «Цветные металлы – 2011»: сб. науч. докл. — Красноярск, 2011. С. 185–192.
3. Ose S., Sorhuus A. K., Wedde G. Apart CDS — A New Compact Multi-Pollutant Pot Gas and Alumina Handling System // Light Metals. 2014. P. 617–622.
4. Bonnier M., Massambi S., Jolas J.-M., Girault G., Demetriou V., Wheaton D. Development of a System Based on Water Atomization to Decrease, Prior to Treatment, the Temperature of the Gas Emitted from Aluminum Cells // Light Metals. The Minerals, Metals & Materials Society. 2007. P. 193–197.
5. Bouhabila E. H., Ness E., Kielland Einejord V., Kristjansson K. An innovative compact heat exchanger solution for aluminum off-gas cooling and heat recovery // Light Metals. 2013. P. 793–797.
6. Кондратьев В. В., Шайдуллин Е. Р., Завадяк А. В. и др. Разработка технологии интенсификации процессов газоудаления и газоочистки алюминиевого производства // Четвертый междунар. конгресс «Цветные металлы – 2012»: материалы конгресса. — Красноярск, 2012. С. 416–419.
7. Bouhabila E. H., Cloutier B., Malard T., Martineau P., Hugues Y. Electrolytic cell gas cooling upstream of treatment center // Light Metals. 2012. P. 545–550.
8. Verbraak P., Turco T., Klut P., Dupon E., Engel E. Pot gas cooling technologies // Light Metals. 2014. P. 635–639.
9. Sorhuus A. K., Ose S., Nilsen B. M. Possible use of 25 mw thermal energy recovered from the potgas at alba line // Light Metals. 2015. P. 631–636.
10. De Gromard A., Lim C., Bouhabila E. H., Cloutier B., Frainais M. Development on electrolytic cell gas cooling // Light Metals. 2014. P. 623–628.
11. Галевский Г. В., Кулагин Н. М., Минцис М. Я., Сиразутдинов Г. А. Металлургия алюминия. Технология, электроснабжение, автоматизация. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Флинта; Наука, 2008. — 528 с.
12. Исаева Л. А., Поляков П. В. Глинозем в производстве алюминия электролизом. — Красноярск: Изд. дом ОАО «БАЗ», 2000. — 199 с.
13. Михалев Ю. Г., Браславский А. Б., Исаева Л. А. Влияние криолитового отношения, перегрева электролита и добавок фторида калия на скорость растворения глинозема // XI Междунар. конф. «Алюминий Сибири – 2005»: материалы конференции. — Красноярск, 2005. С. 6–8.
14. Белолипецкий В. М., Пискажова Т. В. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия. Решение задач управления технологией: монография. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. — 272 с.
15. Борисоглебский Ю. В. Расчет и проектирование алюминиевых электролизеров: учебное пособие. — Л.: Изд. ЛПИ им. М. И. Калинина, 1981. — 80 с.
16. Криворученко В. В., Коробов М. А. Тепловые и энергетические балансы электролизеров. — М.: Гос. науч.-техн. изд. литературы по черной и цветной металлургии, 1963. — 320 с.
17. Федеральный закон РФ № 261-ФЗ. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные Законодательные акты Российской Федерации. Принят Гос. Думой 11.11.2009.