

Увеличение производительности электролизеров путем повышения токовой нагрузки

С.И. Ножко^a, С.М. Тимофеев^b, О.Ю. Сухов^c, Р.С. Вибе^d, А.Э. Овчинников^e, С.А. Зимарев^f

ООО «РУСАЛ – Инженерно-технологический центр», ул. Пограничников 37, стр. 1, Красноярск, Россия
^aSemen.nozhko@rusal.com, ^bSergey.Timofeev@rusal.com, ^cOleg.Sukhov@rusal.com, ^dRoman.Vibe@rusal.com,
^eAlexey.Ovchinnikov@rusal.com, ^fSergey.Zimarev@rusal.com
 Статья поступила 12.02.2017, принята 28.03.2017

В исследовании обоснована возможность увеличения анодной плотности тока на электролизерах С8Б до уровня свыше 0,8 кА. В качестве примера приводится опыт Братского алюминиевого завода, увеличившего плотность тока на С8Б до 0,72 А/см², а на VT-120 — до 0,8 А/см². При этом увеличение силы тока с 120 до 140 кА на VT-120 сопровождалось стабилизацией технологического режима. Для компенсации прихода тепла был увеличен объем жидкого металла в шахте электролизера, изменение конструкции футеровки не проводилось. В 2013 г. на опытной группе С8Б была достигнута анодная плотность 0,76 А/см², при этом дальнейшее повышение ограничивалось техническими возможностями кремниво-преобразовательных подстанций. Таким образом, в технологическом плане для повышения силы тока остается большой задел на будущее. Для дальнейшего увеличения силы тока в 2012–2015 гг. была проведена работа по снижению напряжения электролизных серий — снижено напряжение на электролизерах, часть из них отключена. Это позволило в рамках эксперимента на 3 часа увеличить силу тока до 185 кА, что соответствует анодной плотности тока 0,8 А/см². В ходе эксперимента не отмечено значимого негативного влияния на технологический режим электролизеров.

Ключевые слова: электролиз алюминия; электролизер с верхним токоподводом; эффективная сила тока; увеличение производительности; анодная плотность тока; напряжение серии; предельная плотность тока.

Increase in productivity of electrolyzers by amperage increasing

S.I. Nozhko^a, S.M. Timofeev^b, O.Yu. Sukhov^c, R.S. Vibe^d, A.E. Ovchinnikov^e, S.A. Zimarev^f

“RUSAL - Engineering and Technology Center” Ltd; 37, Pogranichnikov St., Building #1, Krasnoyarsk, Russia
^aSemen.nozhko@rusal.com, ^bSergey.Timofeev@rusal.com, ^cOleg.Sukhov@rusal.com, ^dRoman.Vibe@rusal.com,
^eAlexey.Ovchinnikov@rusal.com, ^fSergey.Zimarev@rusal.com
 Received 12.02.2017, accepted 28.03.2017

This paper demonstrates the possibility of increasing the anode current density of S8B pots to over 0.8 kA. Experience of the Bratsk Aluminium Smelter is given as an example. This smelter increased the current density up to 0.72 A/cm² for S8B pots and up to 0.8 A/cm² for VT-120 pots. The increase of amperage from 120 kA to 140 kA for VT-120 pots was accompanied by stabilization of the technological regime. The amount of liquid metal in the pot was increased to compensate the extra heat inflow. The lining design was not modified. In 2013, anode current density of 0.76 A/cm² was achieved on a pilot group of S8B pots, but the technical capability of the silicon rectifiers came as a constraint for any further increase. Thus, there is still great ground work to increase amperage in future. In 2012–2015, to achieve further increase of amperage, some activities were carried out to decrease voltage of the potlines. Pot voltage was decreased and some pots were disconnected. This made it possible to increase amperage up to 185 kA within a three-hour experiment, which corresponds to anode current density of 0.8 A/cm². In the course of the experiment, there was no significant adverse effect on the technological regime of the pots.

Key words: aluminium reduction technology; vertical stud pot; effective amperage; production capacity increase; anode current density; potline voltage; ultimate current density.

Введение

Развитие алюминиевой промышленности в мире проходит по пути увеличения производительности основного агрегата — электролизера [1]. Можно условно выделить два направления этого процесса: разработка новых сверхмощных электролизеров и повышение производительности на существующих агрегатах.

Разработка новых сверхмощных электролизеров в отечественной алюминиевой отрасли позволило достичь рубежа токовой нагрузки — 300–400 кА [2; 3],

зарубежные исследователи анонсировали создание электролизеров на силу тока до 600 кА [4–9]. Однако строительство новых заводов — весьма затратное мероприятие, поэтому повышение производительности существующих алюминиевых электролизеров также следует рассматривать как вероятное направление развития.

Увеличение производительности на существующих алюминиевых электролизерах можно проводить как путем модернизации, например по предлагаемому

авторами работ [10] техническому решению, так и путем увеличения токовой нагрузки [11; 12], причем предел возможного увеличения токовой нагрузки на сегодня не определен. Интегральной характеристикой, позволяющей сравнить степень интенсификации токовой нагрузки электролизеров различных типов, является величина анодной плотности тока. Сопоставление достигнутой величины анодной плотности тока электролизеров с боковым и верхним токоподводом, а также электролизеров с обожженными анодами позволяет сделать вывод о недозагруженности токовой нагрузкой электролизеров с верхним токоподводом и самообжигающимся анодом. Так, в работе [13] показано, что на электролизерах с боковым токоподводом в начале XXI в. была достигнута анодная плотность тока $0,87 \text{ A/cm}^2$, а величина анодной плотности тока на электролизерах с обожженными анодами, равная 1 A/cm^2 , была достигнута еще в 50-е годы XX в. [14].

Текущая величина анодной плотности тока на электролизерах с верхним токоподводом и самообжигающимся анодом на электролизере типа С8Б и его модификациях (этот тип электролизера является доминирующим в отечественной алюминиевой промышленности) составляет $0,74 \text{ A/cm}^2$. В работе [15] указывалось, что лимитирующим фактором увеличения токовой нагрузки на электролизере данного типа является снижение токовой эффективности — выхода по току — вследствие механического разрушения анода, в том числе по причине изменения теплового баланса электролизера, однако в работах [16–18] показано, что эта проблема в целом решается на основе новых технических и технологических разработок. Поэтому задачу увеличения производительности отечественных заводов путем повышения токовой нагрузки можно выполнить без привлечения существенных инвестиций.

Следует отметить, что долгие годы процесс увеличения производительности существующих электролизеров за счет увеличения силы тока лимитировала также и экономическая составляющая — прямая зависимость себестоимости алюминия-сырца от силы тока, — однако в существующих технико-экономических условиях и, в первую очередь, после проведенной модернизации оборудования литейных отделений ситуация коренным образом изменилась. В настоящее время существенная часть прибыли алюминиевых заводов формируется за счет изготовления продуктов с высокой добавленной стоимостью — сплавов, электротехнической катанки. Поэтому даже небольшое (на несколько долларов) увеличение себестоимости алюминия пренебрежительно мало в сравнении с премиями за выпуск сплавов (сотни долларов). В этом контексте каждую дополнительно выпущенную электролизным производством тонну алюминия-сырца следует рассматривать как потенциальное увеличение производства высокомаржинального продукта литейным отделением. В связи с этим увеличение производительности электролизного производства в настоящее время, несмотря на высокую цену алюминия, более чем актуально, потому как позволяет повысить прибыль алюминиевого завода за счет увеличения выпуска сплавов в литейном переделе и (или) продукции в прокатном отделении и в целом делает алюминиевый завод менее зависимым от

волатильности цены алюминия на Лондонской бирже металлов (LME).

Постановка задачи исследования, краткое описание предыдущих экспериментов. Целью проведенной работы является определение принципиальной возможности повышения производительности путем увеличения силы тока на электролизерах типа С8Б до уровня анодной плотности тока свыше $0,8 \text{ kA}$. Попытки увеличения силы тока на Братском алюминиевом заводе были начаты в конце 90-х гг. XX в. [19]. Путем проб и ошибок сила тока была повышена на электролизерах типа С8Б до уровня анодной плотности тока $0,72 \text{ A/cm}^2$. Однако на идентичном электролизере с верхним токоподводом и самообжигающимся анодом ВТ-120, рассчитанном первоначально на 120 kA , удалось достичь силы тока свыше 140 kA , что соответствует анодной плотности тока $0,8 \text{ A/cm}^2$ [19].

Отдельно следует отметить, что увеличение силы тока на электролизерах типа ВТ-120 на ОАО «РУСАЛ Братск» до $0,8 \text{ A/cm}^2$ сопровождалось стабилизацией технологического режима: увеличилась производительность, вырос выход по току, снизились расходные коэффициенты по основным видам сырья, отсутствовали проблемы с тепловой стабильностью электролизеров. Технология анодного узла также не выявила необходимости доработки [19], и это в целом хорошо согласуется с теоретическими выкладками. Так, в работах [20–22] показано, что увеличение анодной плотности тока приводит к росту выхода по току и снижению расхода анодной массы (рис. 1, 2). Из опыта увеличения токовой нагрузки на электролизерах типа ВТ-120 был сделан вывод, что увеличение анодной плотности тока до величины $0,8 \text{ A/cm}^2$ не сопровождается катастрофическими изменениями теплового баланса, а потому потенциально возможно и на других электролизерах с верхним токоподводом.

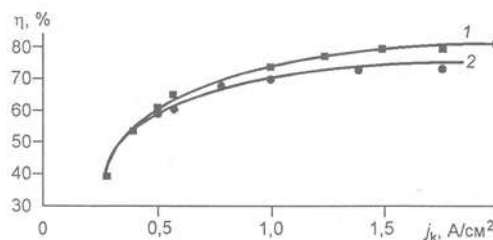


Рис. 1. Зависимость выхода по току от плотности тока [14]: 1 — МПП 5 см, $t = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 — МПП 4 см, $t = 980 \text{ }^\circ\text{C}$

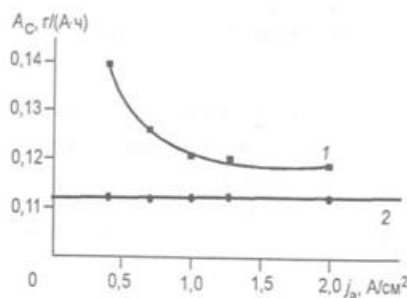


Рис. 2. Зависимость расхода углерода анода от плотности тока [14]: 1 — практический; 2 — теоретический

Для компенсации прихода тепла в зарубежной практике используется снижение криолитового отношения. Таким образом, проблема отвода дополнительно приходящего тепла решается путем возгона из расплава фтористых соединений. В отечественной практике, как правило, используется комбинированный метод: увеличение силы тока сопровождается как снижением криолитового отношения, так и увеличением объема жидкого металла в шахте электролизера. При этом возможность увеличения теплового потока от стенок катодного кожуха путем изменения конструкции футеровки используется ограниченно.

Позднее, в 2013 г., на опытноом участке электролизеров типа С8Б на Братском алюминиевом заводе была достигнута сила тока 175 кА, что соответствует анодной плотности тока $0,76 \text{ A/cm}^2$, причем фактором, ограничившим дальнейшее повышение, стали технические возможности оборудования кремниево-преобразовательных подстанций (КПП). Однако достигнутая величина анодной плотности тока по технологическому состоянию электролизеров не являлась критической и вкупе с нереализованной возможностью увеличения теплового потока от бортов и днища электролизеров путем изменения футеровки, например установки карбидкремниевых боковых блоков, оставляет существенные заделы на будущее в части повышения производительности электролизеров путем увеличения силы тока.

Как показано выше, основной причиной, не позволившей увеличивать силу тока, являлась техническая возможность КПП. Основное ограничение при этом было по величине мощности электролизной серии. Так, в случае уменьшения напряжения ниже критической величины возникала возможность увеличить токовую нагрузку. При этом мощность оставалась неизменной. Для увеличения токовой нагрузки в 2012–2015 гг. была проведена существенная работа по снижению напряжения электролизных серий. По сути, оптимизация напряжения проводилась в двух направлениях:

- снижение напряжения на конкретных электролизерах;
- снижение напряжения путем отключения электролизеров в отложенный ремонт.

Следует отдельно остановиться на втором направлении. С одной стороны, уменьшение количества электролизеров в электролизной серии приводит к уменьшению общей производительности серии. Это верно, но только в стационарном состоянии. Если рассматривать задачу с точки зрения неизменности мощности электролизной серии, то снижение количества электролизеров типа С8Б в серии на один электролизер позволяет снизить напряжение серии примерно на 4,5–4,8 В, что при неизменной мощности серии позволяет увеличить силу тока на серии на 0,7–1,0 кА. Таким образом, производительность серии даже увеличивается. При этом нужно отметить, что металл производится на меньшем количестве агрегатов в серии, что, при прочих равных условиях, снижает трудозатраты и потери сырья, а с учетом приведенной на рис. 1 аналитики и полученной производственной практики еще и должно увеличивать выход по току. Таким образом, работа системы «электролизная серия» в целом становится эффективнее.

Проведенные мероприятия позволили качественно решить проблему управления напряжением электролизной серии и открыли принципиальную возможность увеличения токовой нагрузки до величины свыше $0,8 \text{ A/cm}^2$.

Ход эксперимента. В 2105 г. была предпринята попытка увеличения токовой нагрузки на серии корпусов до значения свыше $0,8 \text{ A/cm}^2$. Эксперимент заключался в кратковременном (на 3 часа) увеличении токовой нагрузки на серии корпусов с целью исследования как технологического отклика электролизеров, так и надежности системы электроснабжения Братского алюминиевого завода в целом. Сила тока была увеличена до 185 кА, что соответствует анодной плотности тока $0,8 \text{ A/cm}^2$. Ввиду того, что подготовка к увеличению токовой нагрузки не сопровождалась серьезными технологическими и техническими мероприятиями (изменением конструкции футеровки, к примеру), оценивалась сама принципиальная возможность повышения нагрузки.

Для оценки результативности эксперимента, ввиду его изначальной краткосрочности, не могли быть использованы «классические» технико-экономические показатели, расходные коэффициенты по основным видам сырья и выход по току. Потому технологическая эффективность эксперимента оценивалась по динамике альтернативных показателей — технологического параметра «частота анодных эффектов» (рис. 3) и динамике технологического параметра «количество статусов "МГД-нестабильность"».

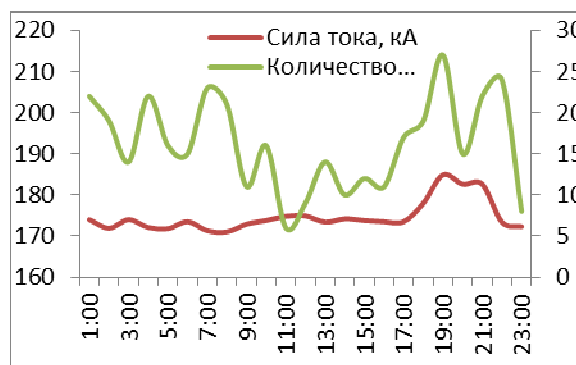


Рис. 3 Динамика силы тока и частоты анодных эффектов во время эксперимента.

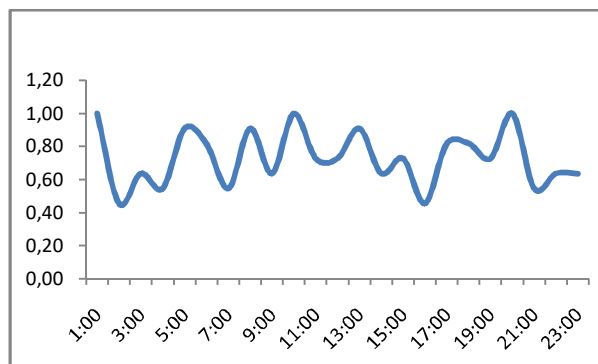


Рис. 4 Динамика количества статусов «МГД-нестабильность» на сериях корпусов во время эксперимента

Частота анодных эффектов (точнее, динамика данного параметра) в целом показывала степень тепловой разбалансированности группы электролизеров, а динамика технологического параметра «количество статусов "МГД-нестабильность"» качественно характеризовала запас энергетической стабильности группы электролизеров. МГД-нестабильность — это параметр, характеризующий работу электролизера как агрегата в коротком промежутке времени путем оценки мгновенных значений флуктуации рабочего напряжения. Динамика количества предельно допустимых значений флуктуаций напряжения на группе электролизеров показывает разбалансированность работы этой группы.

Конечно, столь короткий промежуток времени (всего 3 часа) не позволяет сделать выводы обо всем спектре технико-экономических показателей работы электролизной серии в качественно иных условиях в более продолжительный период, однако и первый полет человека в космос продолжался всего 108 минут и не ставил перед собой конечной целью пилотируемый полет до Луны, но все же показал принципиальную техническую возможность осуществления этого полета...

Основные выводы

1. Текущая технико-экономическая ситуация (невысокая цена алюминия на LME, проведенная модернизация литейного передела) снова сделала актуальным увеличение производительности электролизеров путем повышения токовой нагрузки. Так, при увеличении токовой нагрузки себестоимость алюминия-сырца возрастает максимум на несколько долларов за тонну, однако премии за производство сплавов достигают нескольких сотен долларов (в зависимости от номенклатуры) и в конечном счете увеличивают прибыль алюминиевого завода в целом.

2. Предварительно было установлено, что электролизер типа С8Б, который составляет основу парка электролизеров для производства алюминия в России, относительно электролизеров других типов отличается более низкой анодной плотностью тока, причем выход по току при увеличении анодной плотности тока, согласно существующей теоретической базе, должен расти.

3. Проведенные ранее исследования указывают на наличие технологической возможности дальнейшего повышения силы тока на электролизерах типа С8Б. Факторами, лимитирующими увеличение токовой нагрузки в целом, являются не технология производства анодной массы либо необходимость изменения технологических параметров работы электролизеров, а фактическая величина напряжения электролизной серии как частный случай характеристики работы оборудования КПП.

4. Проведенные мероприятия позволили снизить напряжение электролизных серий до уровня, обеспечивающего увеличение токовой нагрузки до 185 кА, что соответствует анодной плотности тока 0,8 А/см², на краткий (3 часа) промежуток времени.

5. Впервые в отечественной и мировой практике на электролизерах типа С8Б, которые составляют основу парка алюминиевой промышленности России, была достигнута величина анодной плотности тока 0,8 А/см².

6. Проведенный эксперимент по кратковременному (на 3 часа) увеличению токовой нагрузки до 185 кА не выявил существенного технологического дисбаланса электролизеров либо технических проблем в работе оборудования КПП.

Литература

1. Sysoev I.A., Ershov V.A., Kondrat'ev V.V. Method of controlling the energy balance of electrolytic cells for aluminum production // Metallurgist. 2015. Vol. 59, № 3-4.
2. Радионов Е.Ю. Особенности магнитной гидродинамики электролизеров ОА – 300 5-й серии Иркутского алюминиевого завода // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2009. № 4 (40). С. 210-213.
3. Пингин В.В., Завадяк А.В., Архипов Г.В., Пак М.А., Платонов В.В., Прошкин А.В., Скачко А.П., Пузанов И.И. Высоковольтные технологии РУСАЛа – 8 лет динамичного развития // Материалы конгресса «Цветные металлы». 2010. С. 442.
4. Wei L., Dongfang Z., Yafeng L., Ming L., Xiaodong Y. Simulation and measurements on the flow field of 600 kA aluminium reduction pot // Light Metals. 2015. P. 479-482.
5. Forte M., Robitaille M., Gros N., Gariepy R., Mantha I., Lefrancois L., Figue J.-P. Arvida aluminium smelter – AP60 technological center, start-up performance and development of the technology // Light Metals. 2015. P. 495-498.
6. Dongfang Z., Xiandong Y., Ming L., Wey L. CHINALCO 600 kA high capacity low energy consumption reduction cell development // Light Metals. 2015. P. 483-487.
7. Zarouni Al., Zarouni Ab., Ahli N., Akhmetov S., Reverdy M., Hussain M., Nikandrov K., Mishra L. Development history and performance of Dubal DX+ demonstration cells // Light Metals. 2015. P. 489-494.
8. Song Y., Feng N., Peng J., Li B., Wang Q. The influence of cathode shape on current density and metal heave in 300 kA aluminium reduction cell // Light Metals. 2015. P. 827-830.
9. Marineau P., Maltais J.-N., Verin V., Frainais M. Start-up of the ozeos treatment center (GTC) for RTA AP60 // Light Metals. 2015. P. 623-625.
10. Бегунов А.И., Бегунов А.А. Модернизация электролизных производств с использованием анодов Содерберга (в порядке обсуждения) // Цветные металлы. 2011. № 7. С. 45-49.
11. Reverdy M., Zarouni A., Faudou J.-L., Galadari Q., Zarouni Al., Akhmetov S., Aswad K., Jallaf A.-J., Sayed W., Potochik V. Advancements of Dubal High Amperage Reduction Cell Technologies // Light Metals. 2013. P. 553-556.
12. Bugge M., Naakonsen H., Kobbeldt O., Paulsen K.A. High Amperage Operation Of AP18 Pots at Karmoy // Light Metals. 2011. P. 415-419.
13. Галевский Г.В., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Металлургия алюминия. Электроды с анодом Содерберга и их модернизация. М.: Флинта: Наука, 2008. 238 с.
14. Беляев А.И. Электролит алюминевых ванн. М.: Металлургиздат, 1961. 167 с.
15. Ножко С.И., Сухов О.Ю. Практика увеличения производительности алюминиевых электролизеров второго поколения путем увеличения силы тока // Цветные металлы. 2013. № 2. С. 63-66.
16. Ножко С.И., Ворона А.Б., Турусов С.Н., Янко Э.А. Повышение эффективности работы алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом и верхним токоподводом посредством дифференцированной расстановки анодных щтырей // Цветные металлы. 2010. № 3. С. 62-64.

17. Ножко С.И., Блашков А.А. Перспективы повышения мощности алюминиевых электролизеров (в порядке обсуждения) // Цветные металлы. 2012. № 10. С. 65-68.

18. Блашков А.А., Ножко С.И. Дифференциальная схема расстановки анодных штырей на алюминиевом электролизере с самообжигающимся анодом и верхним токоподводом // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 2 С. 53-56.

19. Турусов С.Н., Черневский С.А. Повышение силы тока на ОАО «РУСАЛ Братск». Опыт и перспективы // Техно-экономический вестник РУСАЛа. 2004. № 8. С. 18-21.

20. Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Металлургия алюминия. 2-е изд. Новосибирск: Наука: Сиб. изд. фирма РАН, 2000. 438 с.

21. Сысоев И.А. Опыт управления энергетическим режимом электролизеров с обожженными анодами (од) на силу тока зоока // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2007. № 2-2 (30). С. 23-26.

22. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Шахрай С.Г., Карлина А.И. Разработка способа управления энергетическим режимом электролизеров для производства алюминия // Цветные металлы. 2016. № 5 (881). С. 38-43.

References

1. Sysoev I.A., Ershov V.A., Kondrat'ev V.V. Method of controlling the energy balance of electrolytic cells for aluminum production // Metallurgist. 2015. Vol. 59, № 3-4.

2. Radionov E.Yu. Features of magnetic hydrodynamics of electrolyzers OA - 300 Irkutsk aluminium plant // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2009. № 4 (40). P. 210-213.

3. Pingin V.V., Zavadyak A.V., Arkhipov G.V., Pak M.A., Platonov V.V., Proshkin A.V., Skachko A.P., Puzanov I.I. The High-Ampere Technologies of RUSAL of-8 years of Dynamic Development // Materialy kongressa «Tsvetnye metally». 2010. P. 442.

4. Wei L., Dongfang Z., Yafeng L., Ming L., Xiaodong Y. Simulation and measurements on the flow field of 600 kA aluminium reduction pot // Light Metals. 2015. P. 479-482.

5. Forte M., Robitaille M., Gros N., Garipey R., Mantha I., Lefrancois L., Figue J.-P. Arvida aluminium smelter - AP60 technological center, start-up performance and development of the technology // Light Metals. 2015. P. 495-498.

6. Dongfang Z., Xiandong Y., Ming L., Wey L. CHINALCO 600 kA high capacity low energy consumption reduction cell development // Light Metals. 2015. P. 483-487.

7. Zarouni Al., Zarouni Ab., Ahli N., Akhmetov S., Reverdy M., Hussain M., Nikandrov K., Mishra L. Development history and performance of Dubal DX+ demonstration cells // Light Metals. 2015. P. 489-494.

8. Song Y., Feng N., Peng J., Li B., Wang Q. The influence of cathode shape on current density and metal heave in 300 kA aluminium reduction cell // Light Metals. 2015. P. 827-830.

9. Marineau P., Maltais J.-N., Verin V., Frainais M. Start-up of the ozeos treatment center (GTC) for RTA AP60 // Light Metals. 2015. P. 623-625.

10. Begunov A.I., Begunov A.A. Modernization of Electrolysis Production with Soderberg Anodes // **Non-ferrous Metals**. 2011. № 7. P. 45-49.

11. Reverdy M., Zarouni A., Faudou J.-L., Galadari Q., Zarouni Al., Akhmetov S., Aswad K., Jallaf A.-J., Sayed W., Potochik V. Advancements of Dubal High Amperage Reduction Cell Technologies // Light Metals. 2013. P. 553-556.

12. Bugge M., Haakonsen H., Kobbeldt O., Paulsen K.A. High Amperage Operation Of AP18 Pots at Karmoy // Light Metals. 2011. P. 415-419.

13. Galevskii G.V., Mintsis M.Ya., Sirazutdinov G.A. Prymary aluminium. Soderberg anodes. M.: Flinta: Nauka, 2008. 238 p.

14. Belyaev A.I. Electrolyte of aluminium cells. M.: Metallurgizdat, 1961. 167 p.

15. Nozhko S.I., Sukhov O.Yu. Practice of the production efficiency increasing of the second generation aluminium electrolyzers by the increasing of a current intensity // Non-ferrous Metals. 2013. № 2. P. 63-66.

16. Nozhko S.I., Vorona A.B., Turusov S.N., Yanko E.A. Investigation of Gibbsite Structure with Various Dispersion Degree // Non-ferrous Metals. 2010. № 3. P. 62-64.

17. Nozhko S.I., Blashkov A.A. Perspectives of capacity increasing of aluminium electrolyzers // Non-ferrous Metals. 2012. № 10. P. 65-68.

18. Blashkov A.A., Nozhko S.I. Arrangement Method of Anode Pins on Electrolyser for Fabrication of Aluminium with Self-Baking Anode and Upper Current Lead // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2012. T. 2. P. 53-56.

19. Turusov S.N., Chernevskii S.A. Increase amperage of RUSAL Bratsk // Tekhniko-ekonomicheskii vestnik RUSALa. 2004. № 8. P. 18-21.

20. Borisoglebskii Yu.V., Galevskii G.V., Kulagin N.M., Mintsis M.Ya., Sirazutdinov G.A. Aluminium metallurgy. 2-e izd. Novosibirsk: Nauka: Sib. izd. firma RAN, 2000. 438 p.

21. Sysoev I.A. Experience of management of the power mode of electrolyzers with prebaked anodes (PA) on 300kA current // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2007. № 2-2 (30). P. 23-26.

22. Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V., Shakhrai S.G., Karlina A.I. Development of the method of electrolyzers' energy mode control for aluminium production // Non-ferrous Metals. 2016. № 5 (881). P. 38-43.