

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.713.723

EDN: BPMVPW

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-635-646



Разработка методики постановки высокоамперного электролизёра на электрический обжиг с использованием плавких вставок

Е.Ю. Радионов¹✉¹ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», Красноярск, Россия

Резюме. Цель – разработка и апробация методики расчета подключения электролизера на электрический обжиг без отключения тока серии корпусов электролиза с использованием алюминиевых плавких вставок. Для расчетов сложной электрической цепи был использован метод преобразования электрической цепи, непосредственного применения законов Кирхгофа. Выявление и расчеты полученных закономерностей проводились с помощью графических и аналитических методов. Математическое моделирование проводилось с помощью апробированных компьютерных программ. Разработана методика расчета подключения электролизера на электрический обжиг без отключения тока серии корпусов электролиза. Выполнены расчеты (математическое моделирование) для двух вариантов пуска электролизера: без снятия токовой нагрузки на серии корпусов электролиза и с частичным занижением токовой нагрузки на серии до 250 кА. В корпусах электролиза были выполнены опытные испытания пуска двух высокоамперных электролизеров без отключения тока серии корпусов электролиза, т.е. при рабочем токе 330 кА, и пуск одного электролизера с занижением токовой нагрузки до 250 кА. Полученные в ходе проведенных исследований результаты свидетельствуют о том, что разработанный способ позволяет выполнять постановку высокоамперного электролизера на электрический обжиг с использованием плавких вставок без снятия токовой нагрузки на серии корпусов электролиза, либо с частичным ее занижением. Успешные опытные испытания трех высокоамперных электролизеров, работающих на силе тока 330 кА, дают возможность произвести тиражирование (распространение) данного способа обжига на другие высокоамперные электролизеры, работающие на силе тока 400, 550 кА.

Ключевые слова: производство алюминия, пуск электролизера, электрический обжиг, плавкие вставки, ошиновка

Для цитирования: Радионов Е.Ю. Разработка методики постановки высокоамперного электролизёра на электрический обжиг с использованием плавких вставок // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 635–646. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-635-646>. EDN: BPMVPW.

METALLURGY

Original article

Development of a technology for setting a high-amperage electrolytic cell for electrical preheating using fusible links

Evgeniy Yu. Radionov¹✉¹RUSAL Engineering and Technology Center LLC, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The paper aims to develop and test a design procedure for setting an electrolytic cell for electrical preheating without current interruption in a series of electrolysis units using aluminum fusible links. For the analysis of a complex electrical circuit, the circuit conversion technique, a direct application of Kirchhoff's circuit laws, was used. The obtained patterns were identified and determined using graphical and analytical methods. Mathematical modeling was performed by means of approved programs. A design procedure was developed for setting an electrolytic cell for electrical preheating without current interruption in the series of electrolysis units. The computations (mathematical modeling) were performed for two startup variants: without current load interruption in the series of electrolysis units and with the lowering of current load in the series (to 250 kA). Pilot startup tests of two high-amperage electrolytic cells were performed without current

interruption in the series of electrolysis units, i.e., at an operating current of 330 kA, as well as the startup of one electrolytic cell with the current load lowered to 250 kA. The study results indicate that the developed method allows a high-amperage electrolytic cell to be set for electrical preheating with the use of fusible links without interrupting the current load or with its lowering in the series of electrolysis units. Successful pilot tests of three high-amperage electrolytic cells operating at a current strength of 330 kA provide a means to extrapolate this preheating method to other high-amperage electrolytic cells operating at current strengths of 400 and 550 kA.

Keywords: aluminum production, electrolytic cell start-up, electric firing, fusing links, busbar

For citation: Radionov E.Yu. Development of a technology for setting a high-amperage electrolytic cell for electrical preheating using fusible links. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):635-646. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-635-646>. EDN: BPMVPW.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий нашел широкое применение в различных отраслях промышленности [1, 2]. Предприятия, производящие первичный алюминий, развиваются по пути совершенствования технологии электролиза для достижения высоких технико-экономических показателей [3], поиска альтернативных источников глиноземного сырья или улучшения действующих технологий его производства [4–7], решения экологических проблем, возникающих при получении глинозема и «крылатого» металла [8–13], строительства новых заводов с установкой высокопроизводительных и экологичных высокоамперных электролизеров² [14].

Производство алюминия-сырца на современных алюминиевых заводах происходит на высокоамперных электролизерах с обожженными анодами на силе тока порядка 300–500 кА. Современные исследования показали, что более равномерным, качественным обжигом высокоамперного электролизера является электрический обжиг [15]. При высокой стоимости дизельного топлива и в тоже время наименьшей стоимости электроэнергии на алюминиевых заводах, расположенных в Сибири (Саяногорский, Иркутский, Тайшетский, Богучанский алюминиевые заводы) [16–18], использование электрического обжига является наиболее экономически приемлемым.

Обжиг и последующий пуск алюминиевого электролизера являются неотъемлемой частью его эксплуатационного либо, как отметил автор [19], «жизненного» цикла работы как промышленного агрегата. Качество обжига и пуска электролизера определяет в дальнейшем не только его срок службы, но и

влияет на основные технико-экономические показатели электролиза [20].

Согласно работе авторов [20], в производстве алюминия получили широкое распространение следующие виды обжига электролизера: обжиг на металле, обжиг на сопротивлении и термический обжиг. Прогрев электролизера в первых двух случаях происходит за счет электрического тока, проходящего через уже подключенный в электрическую цепь электролизер. При термическом (или, по-другому, газопламенном) обжиге электролизера используется энергия от сгорания углеводородов, таких как дизельное топливо или природный газ, а уже по прошествии определенного времени обжига (~ 3 сут) с достижением температуры подины, близкой к 850–950 °С, происходит подключение электролизера в электрическую цепь.

Испытания, выполненные авторами [15], показали определенные преимущества электрического обжига высокоамперного электролизера в сравнении с газопламенным.

Однако во всех случаях при пуске электролизера после газопламенного обжига или же перед постановкой электролизера на электрический обжиг требуется минимизировать потери нарабатываемого металла, связанные с остановкой всей серии электролиза с целью безопасного подключения электролизера в электрическую цепь. С этой целью была проведена данная работа, позволившая определить места установки и сечения алюминиевых плавких вставок (ПВ) для постановки электролизера на электрический обжиг либо без отключения тока серии, либо с незначительным ее снижением (~ 25% от полной нагрузки).

²РУСАЛ в Тайшете. РУСАЛ в Иркутской области // Русал. Режим доступа: <https://taishet.rusal.ru/> (дата обращения: 25.04.2024).

РАСЧЕТ ПЛАВКИХ ВСТАВОК

Для электрического обжига в компьютерной программе, используемой для моделирования магнитогидродинамических явлений в алюминиевом электролизере [21–23], были выполнены расчеты с использованием стандартных ПВ, предполагающих снижение токовой нагрузки до 240 кА, и модернизированных. Конструкция последних позволяет поставить электролизер на электрический обжиг без снижения токовой нагрузки серии, т.е. на рабочем токе (в данном случае 330–335 кА). В свою очередь данное техническое решение предполагает не снижать наработку алюминия-сырца на серии в момент пуска (10–15 мин). Также новая конструкция ПВ позволяет провести более плавную корректировку времени перегоранием плавких элементов, в случае их использования при различной температуре ошиновки (например, в случае сезонных колебаний температуры в ± 10 – 15°C , или же пуска в летний и зимний периоды с возможным колебанием максимальных температур от -10 до $+80^\circ\text{C}$).

Перед проведением опытных испытаний по постановке на электрический обжиг трех высокоамперных электролизеров, работающих на силу тока 330 кА, были выполнены стандартные для данного алюминиевого

завода пуска электролизера, т.е. с заливкой электролита после газопламенного обжига на стандартных и модернизированных ПВ.

Стандартные ПВ на алюминиевом заводе используются с 2010 г., а их сечение подобрано опытным путем, поэтому для данных ПВ были выполнены расчеты с использованием данных, полученных при пуске электролизера на газопламенном обжиге. Результаты расчета представлены на рис. 2 и в табл. 1.

Первый опытный пуск электролизера после газопламенного обжига с модернизированными ПВ показал, что рассчитанное количество плавких элементов является избыточным. Перегорание первой ПВ происходит примерно через 18 мин после полной разборки/сборки узлов шунтирования, а последней – через 25 мин.

Также впоследствии было выявлено, что часть тока (~ 30 кА, что составляет $\sim 10\%$ от всей токовой нагрузки) проходит через подину, т.е. минуя узлы шунтирования, а значит, и ПВ (см. табл. 2).

Далее была произведена верификация и идентификация математической модели электролизера с модернизированными ПВ. Результаты расчета представлены на рис. 4 и в табл. 3.

Таблица 1. Результаты расчета силы тока в стандартных плавких вставках и узлах шунтирования перед пуском на электрический обжиг

Table 1. Calculation results of current strength in standard fusible links and shunt units before electrolytic cell start-up for electric firing

Обозначение на схеме	Пояснение	I, кА
1 П	Плавкая вставка 1	16253
2 П	Плавкая вставка 2	16217
1 Ш	Шунт 1	72196
2 Ш	Шунт 2	34720
3 Ш	Шунт 3	57184
4 Ш	Шунт 4	34998
5 Ш	Шунт 5	71987

Таблица 2. Результаты измерений токораспределения перед пуском в блюмсе и катодном блоке

Table 2. Measurement results of current distribution before start-up in the bloom and cathode block

№ катодного блока	I блюмса на выходной стороне электролизера, кА	Σ I в катодном блоке, кА
1	0,4	1
	0,6	
2	0,6	1,3
	0,7	
3	0,5	1,3
	0,8	

Продолжение табл. 2

4	0,6	1,3
	0,7	
5	0,6	1,6
	1	
6	0,5	1,7
	1,2	
7	0,2	0,6
	0,4	
8	0,5	1,1
	0,6	
9	0,9	2,4
	1,5	
10	0,8	2,4
	1,6	
11	0,5	2,2
	1,7	
12	0,7	1,9
	1,2	
13	0,7	1,3
	0,6	
14	0,2	0,5
	0,3	
15	0,6	1,5
	0,9	
16	0,5	1,4
	0,9	
17	0,6	1,4
	0,8	
18	0,4	1
	0,6	
19	0,6	1,5
	0,9	
20	–	0,4
	0,4	
ИТОГО		27,8

Таблица 3. Результаты расчета силы тока в модернизированных плавких вставках и узлах шунтирования перед пуском на электрический обжиг**Table 3.** Calculation results of current strength in upgraded fusible links and shunt units before electrolytic cell start-up for electric firing

Обозначение на схеме	Пояснение	I, кА
1 П	Плавкая вставка 1	11419
2 П	Плавкая вставка 2	5436
3 П	Плавкая вставка 3	3381
4 П	Плавкая вставка 4	5191
5 П	Плавкая вставка 5	11399
1 Ш	Шунт 1	74787
2 Ш	Шунт 2	31509
3 Ш	Шунт 3	54391
4 Ш	Шунт 4	31553
5 Ш	Шунт 5	74629

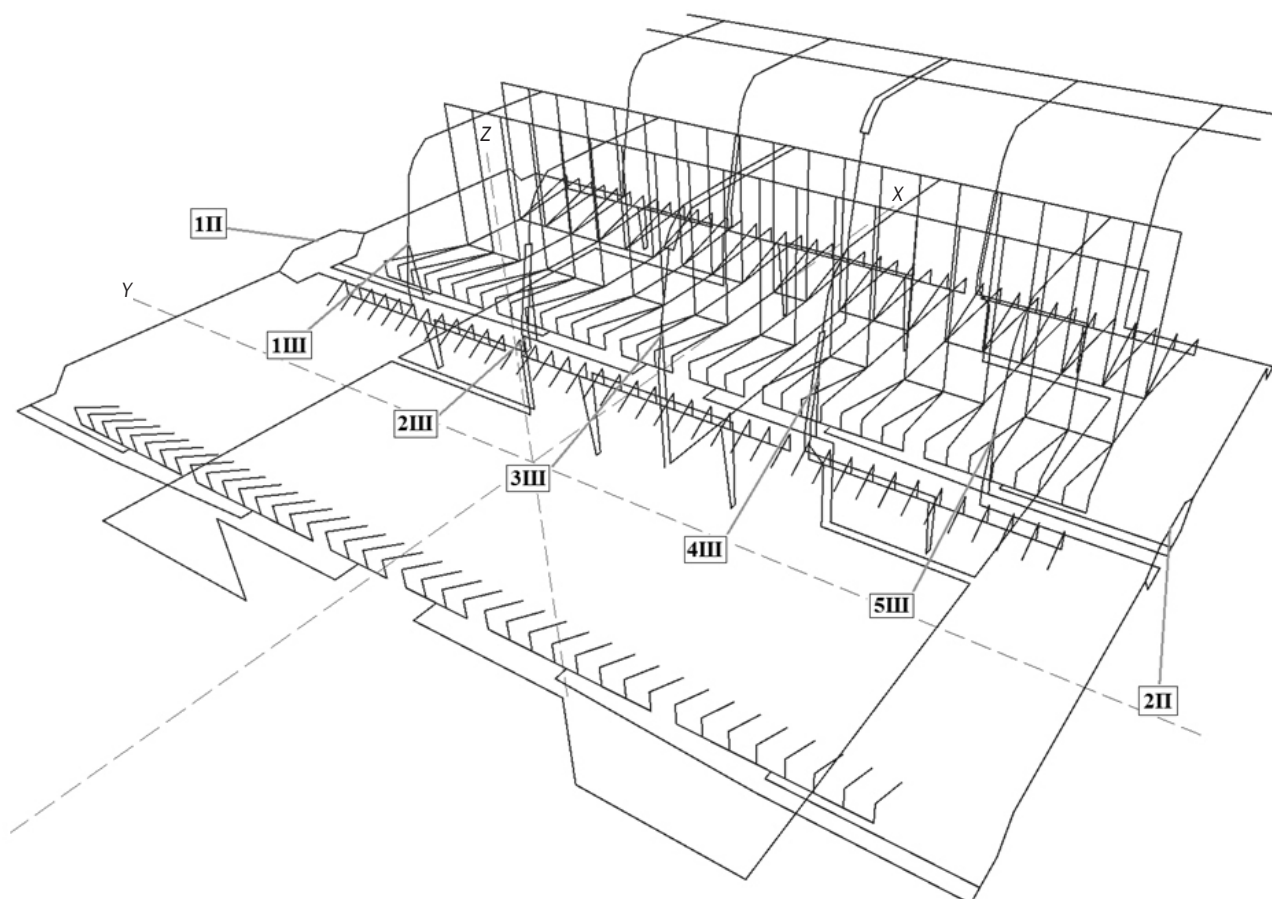


Рис. 1. Схема расположения в электрической цепи электролизера стандартных плавких вставок и узлов шунтирования: 1П, 2П – плавкие вставки, установленные на отметке +4 с глухой и с лицевой стороны соответственно; 1Ш-5Ш – узлы шунтирования

Fig. 1. Layout diagram of standard fusible links and shunt units in the electrolytic cell electrical circuit: 1П, 2П – fusible links installed at +4 mark on the blind and face sides, respectively; 1Ш-5Ш – shunt units

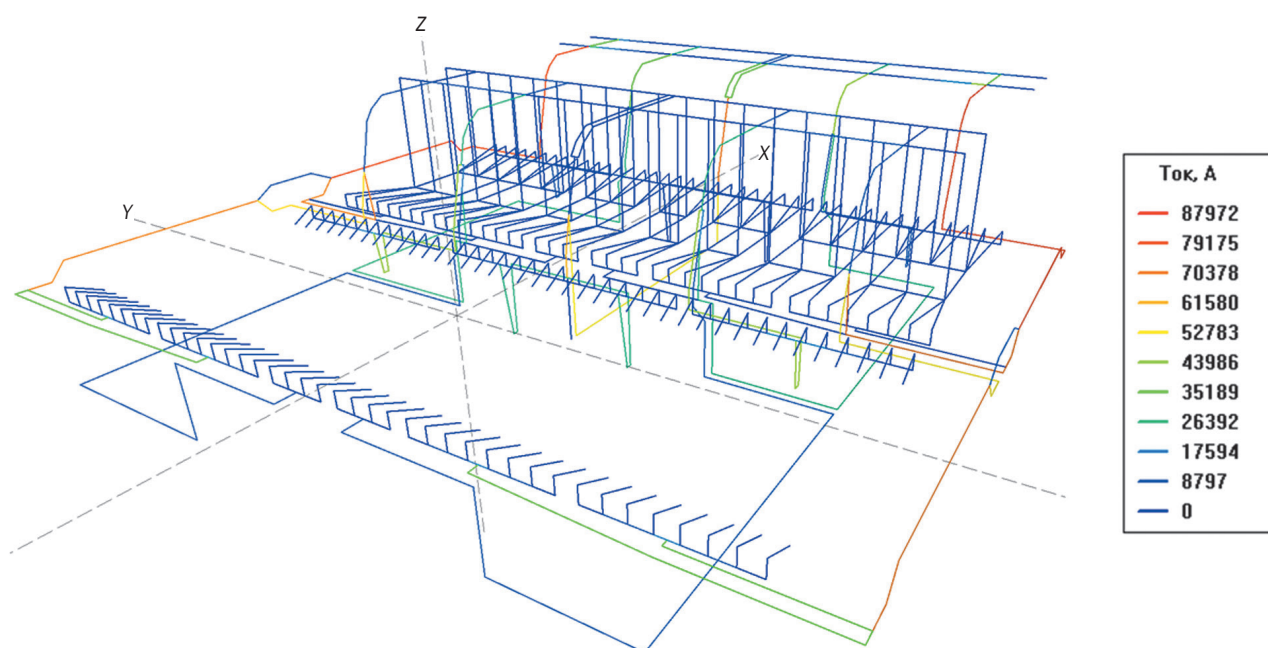


Рис. 2. Результаты расчета распределения тока в ошиновке с установленными стандартными плавкими вставками (в электрической цепи плавкие вставки и шунты)

Fig. 2. Calculation results of current distribution in a busbar with installed standard fusible links (fusible links and shunts in the electrical circuit)

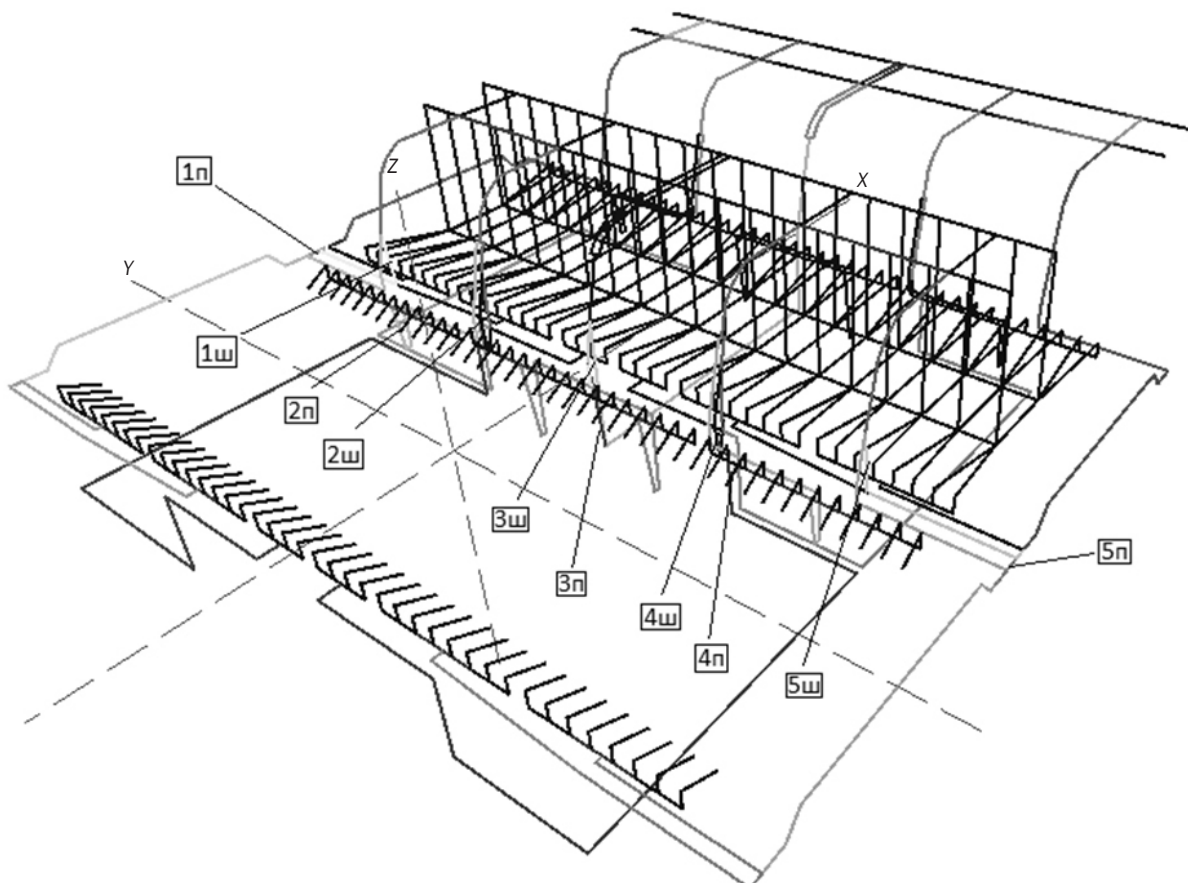


Рис. 3. Схема расположения в электрической цепи электролизера модернизированных плавких вставок и узлов шунтирования: 1П, 5П – плавкие вставки, установленные на отметке +4 с глухой и с лицевой стороны соответственно; 2П-4П – плавкие вставки, установленные на отметке ± 0 ; 1Ш-5Ш – узлы шунтирования

Fig. 3. Layout diagram of the upgraded fuse links and shunt units in the electrolytic cell electrical circuit: 1П, 5П – fusible links installed at +4 mark on the blind and face sides, respectively; 2П-4П – fuse links installed at ± 0 mark; 1Ш-5Ш – shunt units

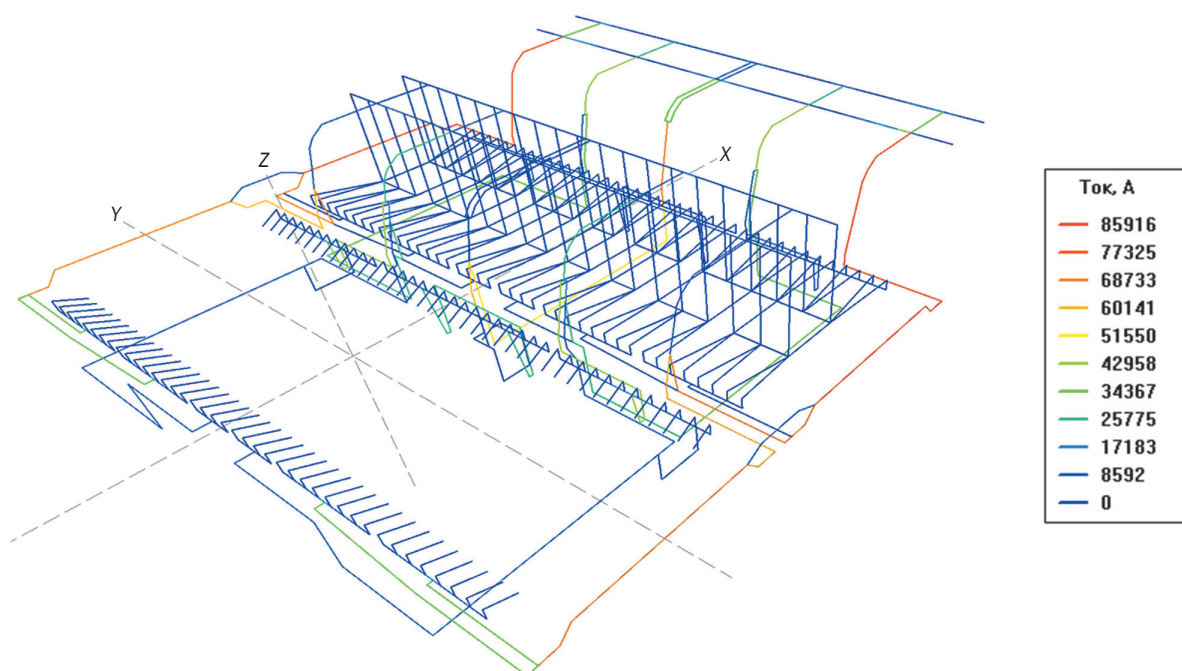


Рис. 4. Результаты расчета распределения тока в ошиновки с установленными модернизированными плавкими вставками (в электрической цепи плавкие вставки и шунты)

Fig. 4. Calculation results of current distribution in busbars with installed upgraded fusible links (fusible links and shunts in the electrical circuit)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Стандартные плавкие вставки. Испытание стандартных ПВ при постановке ванн на электрический обжиг проводилось на высокоамперном электролизере, работающем на силе тока 330 кА. Время монтажа ПВ на электролизер составило ~ 1 ч. На пуске токовая нагрузка была снижена до 240 кА. Затем проводили разборку и последующую сборку узлов шунтирования с установкой изоляционных пластин. Разборка/сборка узлов шунтирования выполнялась с 3-го (центрального

анодного стояка) и далее последовательно по продвижению к выходам ванны на глухой и лицевой торцы: анодные стояки 2 и 4, а затем, соответственно, 1 и 5.

Время срабатывания ПВ после полного зашунтирования электролизера составило 12 мин с глухой стороны и 13 мин с лицевой.

Смонтированные до и после пуска ПВ на электролизере представлены на рис. 5. Результаты измерения температуры с помощью тепловизора Flir T-430SC представлены на рис. 6. График изменения тока и напряжения электролизера в момент пуска представлен на рис. 7.

**a****b**

Рис. 5. Стандартная плавкая вставка, установленная на электролизер: а – до перегорания, б – после перегорания
Fig. 5. A standard fusible link installed on the electrolytic cell: a – before failure, b – after failure

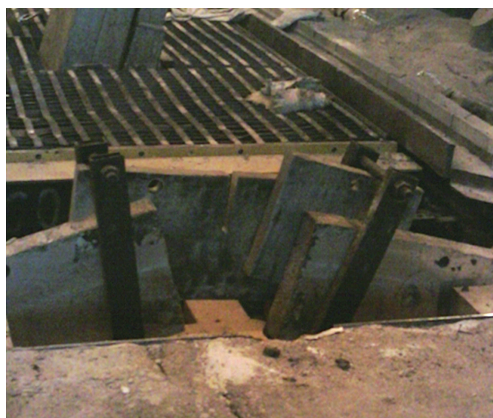
**a****b****+150°C****-4°C**

Рис. 6. Измерение температуры стандартной плавкой вставки с помощью тепловизора Flir T-430SC: а – до расшунтирования электролизера; б – после расшунтирования последнего анодного стояка

Fig. 6. Standard fusible link temperature measurement using the Flir T-430SC thermal imager: a – before electrolytic cell disconnection; b – after the last anode riser disconnection

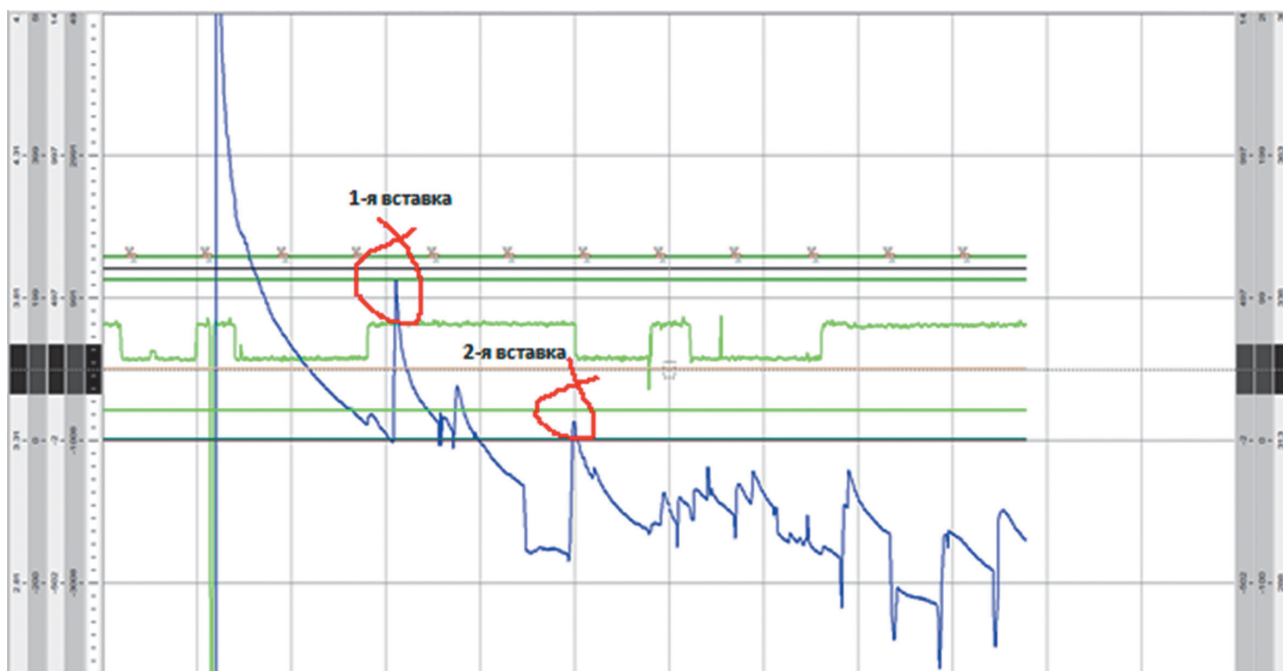


Рис. 7. График изменения тока (ломаная линия зеленого цвета) и напряжения электролизера (ломаная линия синего цвета) в момент пуска

Fig. 7. Graph of current variation (green polyline) and electrolytic cell voltage (blue polyline) at the start-up moment

Промышленное испытание стандартных ПВ со снижением токовой нагрузки до 240 кА показало, что их место установки на ванне выбрано верно, а рассчитанное сечение способствует оптимальному времени перегорания, т.е. 10–15 мин.

Модернизированные плавкие вставки. Испытание модернизированных ПВ было

выполнено на двух высокоамперных электролизерах такой же конструкции, что и при пуске на стандартных ПВ. Время монтажа ПВ на каждый электролизер составило ~ 2,5 ч, в отличие от стандартных плавких вставок. Смонтированные на электролизер ПВ представлены на рис. 8.

После установки ПВ на ванну с использо-



a



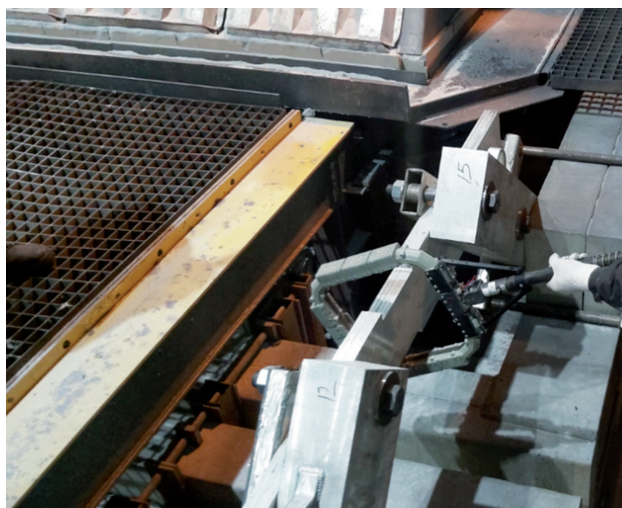
b

Рис. 8. Модернизированные плавкие вставки, установленные на электролизер 1: а – на отметке +4; б – на отметке ± 0

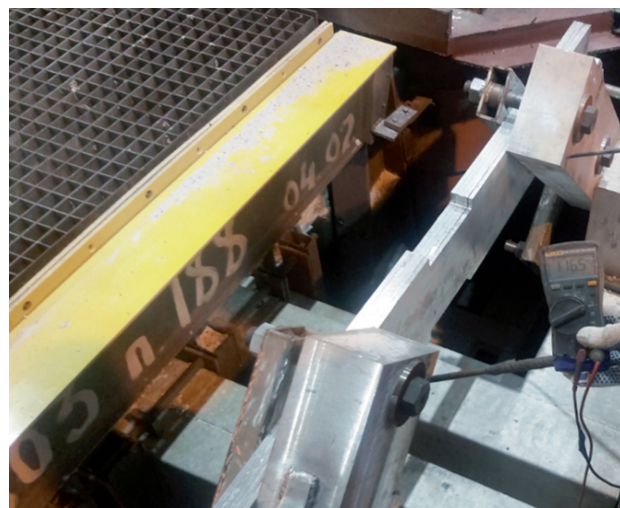
Fig. 8. Upgraded fuse links installed on the electrolytic cell 1: a – at +4 mark; b – at ± 0 mark

ванием токовых клещей (рис. 9 а), а также цифрового мультиметра (рис. 9 б) были выполнены измерения тока и перепадов напряжения в узлах сборки. Схема измерений представлена на рис. 10, результаты измерений – в табл. 4 и 5.

При пуске на модернизированных ПВ занижение токовой нагрузки, как уже говорилось ранее, не требовалось, поэтому пуск проходил на токе 330 кА. Разборка и сборка шунтов выполнялись в том же порядке, что и при пуске на стандартных ПВ.



а



б

Рис. 9. Фото выполнения измерений на модернизированных плавких вставках: а – измерение тока с помощью токовых клещей; б – измерение перепада напряжения с помощью мультиметра

Fig. 9. Images of measurements performed on upgraded fusible links: а – current measurement using current clamps; б – voltage drop measurement using a multimeter

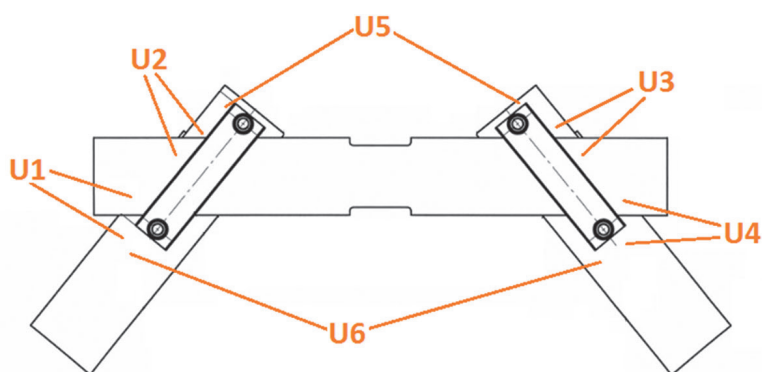


Рис. 10. Схема измерений перепадов напряжения в сборных узлах модернизированной плавкой вставки: U1-U6 – участки измеренных значений перепадов напряжения на смонтированной плавкой вставке

Fig. 10. Diagram of voltage drops measurements in the upgraded fusible link assembly units: U1-U6 – sections of the measured voltage drops on the mounted fusible link

Таблица 4. Результаты измерений силы тока и перепадов напряжения в узлах сборки плавкой вставки (U1–U6) на электролизере 1

Table 4. Measurement results of current strength and voltage drops in the electrolytic cell 1 fusible link assembly units (U1–U6)

№ ПВ	I, кА	Перепады напряжения в узлах сборки плавкой вставки, мВ					
		U1	U2	U3	U4	U5	U6
1	6,9	65	88	13	65	63	200
2	2,6	112	40	23	28	77	220
3	2,3	49	7	18	51	33	140
4	4,5	63	24	24	18	58	176
5	11,3	15	22	35	17	116	161

Таблица 5. Результаты измерений силы тока и перепадов напряжения в узлах сборки плавкой вставки (U1–U6) на электролизере 2**Table 5.** Measurement results of current strength and voltage drops in the electrolytic cell 2 fusible link assembly units (U1–U6)

№ ПВ	I, кА	Перепады напряжения в узлах сборки плавкой вставки, мВ					
		U1	U2	U3	U4	U5	U6
1	3,1	76	33	85	75	132	281
2	3,5	120	45	27	47	80	255
3	1,7	132	10	19	8	80	255
4	4,9	12	55	30	117	91	233
5	11,2	40	40	51	20	145	202

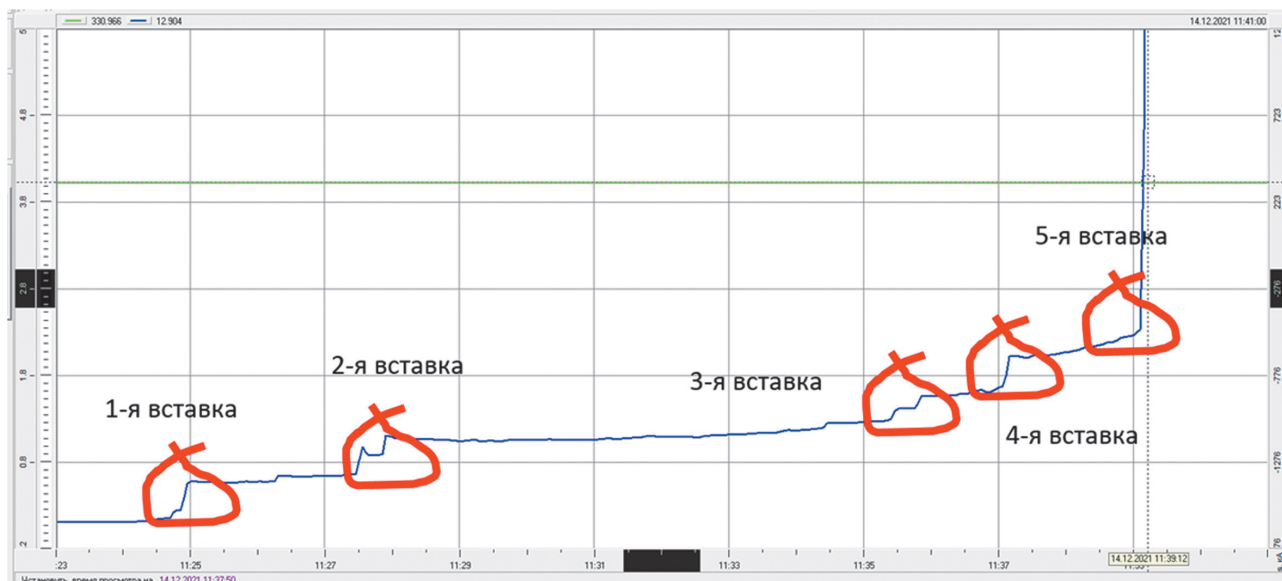
**Рис. 11.** График изменения напряжения электролизера 2 в момент пуска**Fig. 11.** Graph of electrolytic cell 2 voltage variation at the start-up moment

График изменения напряжения электролизера 2 в момент пуска представлен на рис. 11.

Согласно данным, представленным на рис. 11, после полного расшунтирования электролизера время перегорания плавких вставок, смонтированных на отметке +4 (ПВ 1 и ПВ2), составило 10 и 12 мин соответственно. Время перегорания ПВ3 -5 (отм. ±0) составило 15 мин с интервалом в 1 мин для каждой ПВ.

Промышленные испытания модернизированных ПВ без снижения токовой нагрузки показали, что место их установки выбрано верно, а рассчитанное сечение способствует оптимальному времени перегорания плавких элементов, т.е. 10–15 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика расчета постановки высокоамперного электролизера на электрический обжиг с использованием плавких вставок.

2. Выполнены расчеты и промышленные испытания пуска электрическим обжигом высокоамперного электролизера со стандартными и модернизированными плавкими вставками.

3. Промышленные испытания пуска электролизера на стандартных и модернизированных ПВ без снижения токовой нагрузки показали, что их место установки выбрано верно, а рассчитанное сечение способствует оптимальному времени перегорания плавких элементов, т.е. 10–15 мин.

Список источников

1. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
2. Dudin M.N., Voykova N.A., Frolova E.E., Artemieva J.A., Rusakova E.P., Abashidze A.H. Modern trends and challenges of development of global aluminum industry // Metalurgija. 2017. Vol. 56. No. 1-2. P. 255–258.

3. Blais M., Désilets M., Lacroix M. Energy savings in aluminum electrolysis cells: effect of the cathode design // *The Minerals, Metals & Materials Series* / eds. B.A. Sadler. Cham: Springer, 2013. P. 627–631. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch107>.
4. Loginova I.V. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit // *Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013. Vol. 54. No. 2. P. 143–147. <https://doi.org/10.3103/S1067821213020089>. EDN: RFAJAX.
5. Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process // *Metals*. 2023. Vol. 13. Iss. 9. P. 1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
6. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // *Non-ferrous Metals*. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV.
7. Aleksandrov A.V., Aleksandrov V.V. Improving the quality of alumina-containing sinter using water-cooled furnace shell // *Science of Sintering*. 2012. Vol. 44. Iss. 3. P. 281–286. <https://doi.org/10.2298/SOS1203281A>.
8. Зенкин Е.Ю., Гавриленко А.А., Немчинова Н.В. О переработке отходов производства первичного алюминия ОАО «РУСАЛ Братск» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 3. С. 123–132. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>.
9. Сторожев Ю., Поляков П., Дектерев А., Казанцев Я. К вопросу очистки анодных газов электролизера с анодом Содерберга // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 11. С. 15–19. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-15-19>. EDN: OXKBKT.
10. Zhao Xia, Ma Lei. Hazardous waste treatment for spent pot liner // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2018. Vol. 108. Iss. 4. P. 042023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042023>.
11. Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В., Гавриленко А.А. Изучение вещественного состава глиноземсодержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия // *Цветные металлы*. 2018. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>. EDN: YUCHKI.
12. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Vologin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021. Vol. 62. Iss. 6. P. 659–667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
13. Петровский А.А., Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Корепина Н.А. Использование кека выщелачивания от переработки огнеупорной футеровки демонтированных электролизеров в производстве цемента // *iPolytech Journal*. 2022. Т. 26. № 4. С. 697–708. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-697-708>. EDN: EGMMXU.
14. Пузанов И.И., Волохов И.Н., Быков Р.Ю., Муравьев С.А. Пуск РА-400 на Тайшетском алюминиевом заводе // *Цветные металлы и минералы – 2024: сб. тез. докл. XII Междунар. конгресса (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.)*. Красноярск, 2024. С. 213–215.
15. Puzanov I., Zavadyak A., Tretiyakov Y., Morozov M., Gubin A., Platonov V., et al. Electrical resistance preheating of high-amperage cells // *Engineering & Technologies*. 2014. Vol. 7. Iss. 5. P. 552–560.
16. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental Aspects of UC RUSAL'S Aluminum Smelters Sustainable Development // *Light Metals* / eds. C. Chesonis. Cham: Springer, 2019. P. 553–563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUYU.
17. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014 // *Light Metals* / eds. M. Hyland. Cham: Springer, 2015. P. 757–762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128. EDN: VADMNZ.
18. Семьянинов Д.М., Кошкарев С. А. Успешная реализация проекта увеличения силы тока на 17 кА до 330 кА на электролизерах ОА-300 на заводе РУСАЛ // *Цветные металлы и минералы – 2024: сб. тез. докл. XII Междунар. конгресса (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.)*. Красноярск, 2024. С. 251–253.
19. Поляков П.В. Жизнь алюминиевого электролизера как диссипативной системы: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. 190 с.
20. Сорлье М., Ойя Х.А. Катоды алюминиевого электролизера / пер. с англ.; под ред. П.В. Полякова. Красноярск: Версо, 2013. 720 с.
21. Радионов Е.Ю. Расчет магнитогидродинамических параметров работы электролизеров с различным типом катодного кожуха // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 684–693. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>. EDN: LRHDLJ.
22. Bojarevics V. MHD of aluminium cells with the effect of channels and cathode perturbation elements // *The Minerals, Metals & Materials Series* / eds. B.A. Sadler. Cham: Springer, 2013. P. 609–614. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch104>.
23. Радионов Е.Ю., Немчинова Н.В., Третьяков Я.А. Моделирование магнитогидродинамических процессов в электролизерах при получении первичного алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 7. С. 112–120. EDN: UBLOMB.

References

1. Grjotheim K., Kvande H. *Introduction to aluminium electrolysis*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 1993, 260 p.
2. Dudin M.N., Voykova N.A., Frolova E.E., Artemieva J.A., Rusakova E.P., Abashidze A.H. Modern trends and challenges of development of global aluminum industry. *Metalurgija*. 2017;56(1-2):255-258.

3. Blais M., Désilets M., Lacroix M. Energy savings in aluminum electrolysis cells: effect of the cathode design. In: Sadler B.A. (eds.). *The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2013, p. 627-631. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch107>.
4. Loginova I.V. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit. *Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013;54(2):143-147. <https://doi.org/10.3103/S1067821213020089>. EDN: RFAJAX.
5. Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process. *Metals*. 2023;13(9):1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
6. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-ferrous Metals*. 2018;2:11-16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV.
7. Aleksandrov A.V., Aleksandrov V.V. Improving the quality of alumina-containing sinter using water-cooled furnace shell. *Science of Sintering*. 2012;44(3):281-286. <https://doi.org/10.2298/SOS1203281A>.
8. Zenkin E.Yu., Gavrilenko A.A., Nemchinova N.V. On RUSAL Bratsk JSC primary aluminum production waste recycling. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(3):123-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>.
9. Storozhev Yu.I., Polyakov P.V., Dekterev Ar.A., Kazantsev Ya.V. To the question of cleaning anodic gases of the cell with the Soderberg's anode. *Ecology and Industry of Russia*. 2019;23(11):15-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-15-19>. EDN: OXKBKT.
10. Zhao Xia, Ma Lei. Hazardous waste treatment for spent pot liner. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2018;108(4):042023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042023>.
11. Burdonov A.E., Zelinskaya E.V., Gavrilenko L.V., Gavrilenko A.A. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye metally*. 2018;3:32-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>. EDN: YUCHKI.
12. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Volgin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62(6):659-667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
13. Petrovskiy A.A., Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Korepina N.A. Use of leaching cake from refractory lining of dismantled electrolyzers in cement production. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):697-708. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-697-708>. EDN: EGMMXU.
14. Puzanov I.I., Volokhov I.N., Bykov R.Yu., Muravyev S.A. Launch of RA-400 at Taishet aluminium smelter. In: *Tsvetnye metally i mineraly – 2024: sbornik tezisev dokladov XII Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals and minerals: book of abstracts*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2024, p. 213-215.
15. Puzanov I., Zavadyak A., Tretiyakov Y., Morozov M., Gubin A., Platonov V., et al. Electrical resistance preheating of high-amperage cells. *Engineering & Technologies*. 2014;7(5):552-560.
16. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL'S aluminum smelters sustainable development. In: Chesonis C. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2019, p. 553-563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUY.
17. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's Smelters 2012-2014. In: Hyland M. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2015, p. 757-762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128. EDN: VADMNZ.
18. Semyaninov D.M., Koshkarev S.A. Successful implementation of a project on increasing amperage by 17 kA up to 330 kA on OA-300 pots at a RUSAL smelter. In: *Tsvetnye metally i mineraly – 2024: sbornik tezisev dokladov XII Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals and minerals: book of abstracts*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2024, p. 251-253.
19. Polyakov P.V. *Life of an aluminum electrolyzer as a dissipative system*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2018, 190 p. (In Russ.).
20. Sørlie M., Øye H.A. Cathodes in aluminium electrolysis, 2013, 720 p. (Russ. ed.: *Katody alyuminievogo elektrolizera*. Krasnoyarsk: Verso; 2013, 720 p.)
21. Radionov E.Yu. Calculation of magnetohydrodynamic electrolyser parameters with various types of cathode shell. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(3):684-693. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>. EDN: LRHDLJ.
22. Bojarevics V. MHD of aluminium cells with the effect of channels and cathode perturbation elements. In: B.A. Sadler. (eds.). *The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2013, p. 609-614. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch104>.
23. Radionov E.Yu., Nemchinova N.V., Tretiyakov Ya.A. Magnetohydrodynamic processes modeling in electrolyzers at primary aluminum production. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;7:112-120. (In Russ.). EDN: UBLOMB.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**Радионов Евгений Юрьевич,**

к.т.н.,

заместитель директора департамента по разработке
ошиновки и измерениям,

ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,

660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1, Россия

✉ evgeniy.radionov@rusal.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**Evgeniy Yu. Radionov,**

Cand. Sci. (Eng.),

Deputy Director of the Department for Busbar
and Measurement Development,

RUSAL Engineering and Technology Center LLC,

37/1, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia

✉ evgeniy.radionov@rusal.com

Заявленный вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании
полученных результатов провел обобщение, подгото-
вил рукопись к печати.

Author contribution

The author performed a comprehensive analysis, made
a generalization on the basis of the results obtained
and prepared the manuscript for publication.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант ру-
кописи.

*The final manuscript has been read and approved by
the author.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.10.2024 г.; одобре-
на после рецензирования 08.11.2024 г.; принята к
публикации 28.11.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 18.10.2024; approved
after reviewing 08.11.2024; accepted for publication
28.11.2024.