

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.713.723.4

EDN: SQDXJN

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-412-424



Влияние состава анодной массы самообжигающегося анода на показатели электролитического получения алюминия

Н.В. Немчинова^{1✉}, Е.А. Ткач², А.А. Тютрин³, С.С. Бельский⁴¹⁻⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – провести анализ влияния вида кокса (нефтяного, пекового) в составе анодной массы самообжигающегося анода на показатели электролиза. Для достижения цели был произведен сбор производственных данных с работающих электролизеров типа С-8Б(М) с анодами Содерберга в период с июня по октябрь 2024 г. Данные собирались со 172 электролизеров, установленных в серии № 1, и со 186 – в серии № 2. Показано, что выход угольной пены преобладает на электролизерах с анодами, в состав анодной массы которых входит нефтяной кокс, и составил на 1 электролизер 15,9 кг (против 8,4 кг на ваннах с анодами на основе массы из пекового кокса). Удельный расход электроэнергии за исследуемый период на серию ванн, работающих с анодной массой на основе нефтекокса, составил 15393 кВт·ч/т Al (против 15341 кВт·ч/т Al). Показано, что расход анодной массы на основе нефтяного кокса на 1 электролизер выше на 1,82 т, чем на ваннах, работающих на пековом коксе (при скорости сгорания анода 1,5 см/сут и 1,47 см/сут соответственно). В период исследований зафиксировано 285 технологических нарушений при перестановке анодных штырей (протечи пека, гажения) на анодах, в состав масс которых входил нефтекокс (при 121 нарушении на другом виде кокса). Таким образом, сравнительный анализ данных при обслуживании электролизеров с анодами Содерберга показал, что наименьшими выходом угольной пены, удельными расходами электроэнергии и анодной массы и скоростью сгорания анода характеризуются аноды, сформированные из массы на основе пекового кокса. Что свидетельствует о том, что для повышения эффективности алюминиевого производства необходимо использовать пековый кокс при производстве анодной массы самообжигающегося анода электролизера.

Ключевые слова: производство алюминия, самообжигающийся анод, анодная масса, нефтяной и пековый коксы

Для цитирования: Немчинова Н.В., Ткач Е.А., Тютрин А.А., Бельский С.С. Влияние состава анодной массы самообжигающегося анода на показатели электролитического получения алюминия // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 412–424. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-412-424>. EDN: SQDXJN.

METALLURGY

Original article

Effect of the anode paste composition of a self-baking anode on the performance of electrolytic aluminum production

Nina V. Nemchinova^{1✉}, Evgenii A. Tkach², Andrey A. Tyutrin³, Sergei S. Belskii⁴¹⁻⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The present study aims to analyze the effect of the coke type (petroleum, pitch) in the composition of an anode paste for a self-baking anode on electrolysis indicators. We collected production data from operating S-8B(M) electrolytic cells with Soderberg anodes in the period from June to October 2024, including 172 and 186 electrolytic cells installed in Series 1 in Series 2, respectively. The yield of coal foam is higher in electrolytic cells with petroleum coke anodes: 15.9 kg per 1 electrolytic cell versus 8.4 kg in cells with anodes based on pitch coke paste. During the studied period, the specific power consumption for a series of cells operating with petroleum coke paste was 15,393 kWh/t Al versus 15,341 kWh/t Al. The consumption of petroleum coke anode paste per 1 electrolytic cell is 1.82 t higher than that of cells operating on pitch coke at an anode combustion rate of 1.5 and 1.47 cm/day, respectively. The anode pin rearrangement performed during the research period revealed 285 technological violations, e.g., pitch leaks and gassing, for petroleum coke anodes as compared to 121 violations for another coke type. A comparative analysis of the data collected during the maintenance of electrolytic cells with Soderberg anodes proved pitch coke anodes to have the lowest carbon foam yield, specific power and anode paste consumption, and

anode combustion rate. Thus, using pitch coke in the anode paste for self-baking anodes of electrolytic cells can enhance the efficiency of aluminum production.

Keywords: aluminum production, self-baking anode, anode paste, petroleum and pitch cokes

For citation: Nemchinova N.V., Tkach E.A., Tyutrin A.A., Belskii S.S. Effect of the anode paste composition of a self-baking anode on the performance of electrolytic aluminum production. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):412-424. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-412-424>. EDN: SQDXJN.

ВВЕДЕНИЕ

Производство алюминия занимает ведущие позиции среди цветных металлов в мире по объемам производства, качеству выпускаемой продукции и номенклатуре изделий [1, 2]. Крупнейшими производителями алюминия являются Китай, Россия, Индия [3–7]. Российская алюминиевая промышленность идет по пути модернизации действующих производств, введения в эксплуатацию новых мощностей и решения экологических проблем [8–15].

Одним из крупнейших потребителей углерода в Российской Федерации является алюминиевая промышленность: в процессе электролитического получения алюминия используются углеродсодержащие аноды как неотъемлемый конструктивный элемент электролизеров [16–18]. Электролизные ванны бывают двух типов:

- с предварительно обожженными анодами (ОА);
- самообжигающимися анодами (СА) (анодами Содерберга) [19].

Идея самообжигающегося анода была заимствована из опыта эксплуатации руднотермических печей, применяемых для производства ферросплавов, и принадлежит норвежскому инженеру Карлу Вильгельму Содербергу. Электрод Содерберга был дополнительно усовершенствован для получения алюминия ~ в 1930 г. (рис. 1).

В настоящее время в компании «Русал» идет модернизация предприятий, оснащенных ваннами с СА (Красноярский, Братский, Иркутский алюминиевые заводы): перевод действующего производства на эксплуатацию ванн типа «ЭкоСодерберг»⁵, строительство новых корпусов, которые будут оснащаться уже ваннами с ОА. Аноды алюминиевых электролизеров играют важную роль в технологии электролитического производства алюминия. Качество анодов зависит от

целого ряда условий, начиная со свойств исходного электродного сырья, условий производства анодной массы (АМ) и заканчивая состоянием и качеством ведения технологии электролиза на самих электролизерах [20].

По мере сгорания анода масса, сформированная из кокса-наполнителя и связующего, продвигается вниз по стальному анодному кожуху, спекаясь при попадании в средний слой (горячую часть анода). В процессе электрохимического взаимодействия углерода анода с компонентами электролита (оксифторидными комплексами) анод расходуется ~ на 2 см в сутки, для непрерывности процесса фильерные брикеты из анодной массы равномерно подаются на верхнюю часть анодного устройства электролизера по всей его площади, пополняя количество израсходованной в процессе сгорания массы. Максимальная температура самообжига – от 950 до 980 °С⁶.

Правильный выбор исходных материалов (пека и кокса) для оптимального состава анода является наиболее сложной, но в то же время главной задачей для осуществления производства первичного алюминия [21]. Основные свойства коксов и пека в основной степени зависят от того, из каких продуктов нефтепереработки они получены. Многие структурно-химические особенности исходных продуктов сохраняют свои свойства по всей цепи превращений – от первичных смол, тяжелых остатков нефтепереработки до выпуска АМ и далее до формирования электропроводных анодов на электролизерах [22].

Загружаемая в анодное устройство АМ почти на три четверти состоит из наполнителя (кокса) и на одну четверть из связующего материала (каменноугольного пека). Коксование пека и цементирование им наполнителя составляет основу технологического процесса спекания анода при одновремен-

⁵ЭкоСодерберг. Режим доступа: <https://rusal.ru/innovation/technology/ekosoderberg/>. (дата обращения: 05.03.2025).

⁶Гринберг И.С. Технология самообжигающихся анодов электролизеров для производства алюминия: учеб. пособ. Иркутск: ИрГТУ, 1996. 107 с.

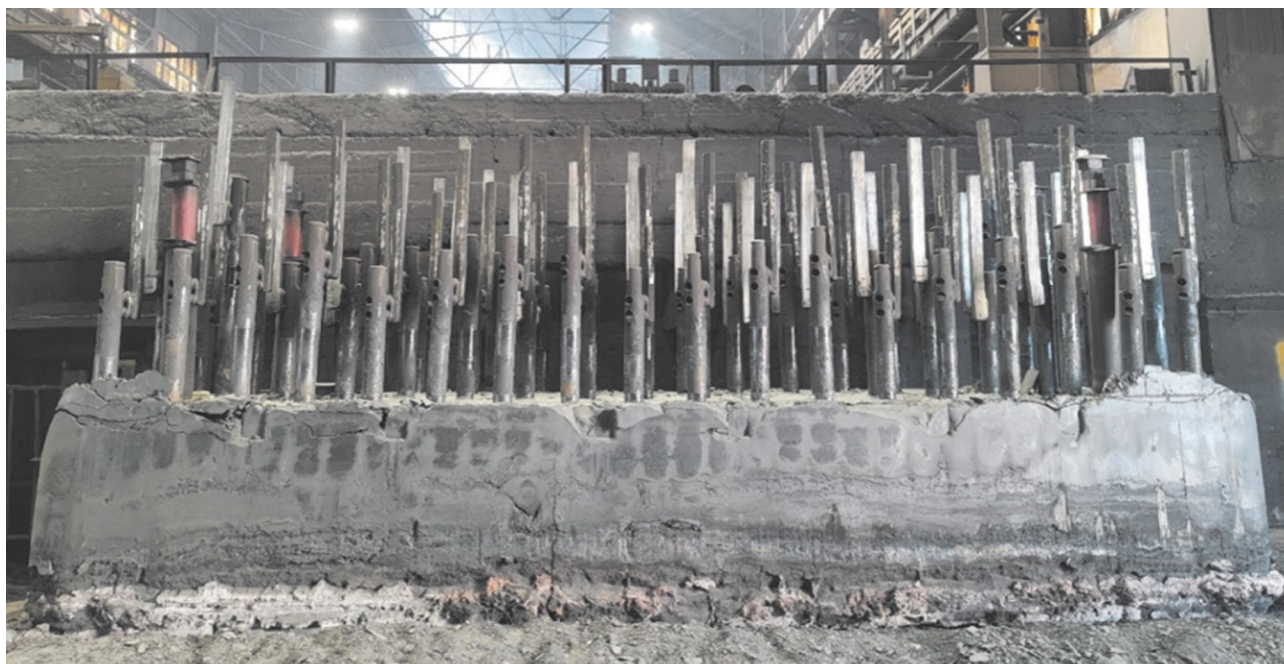
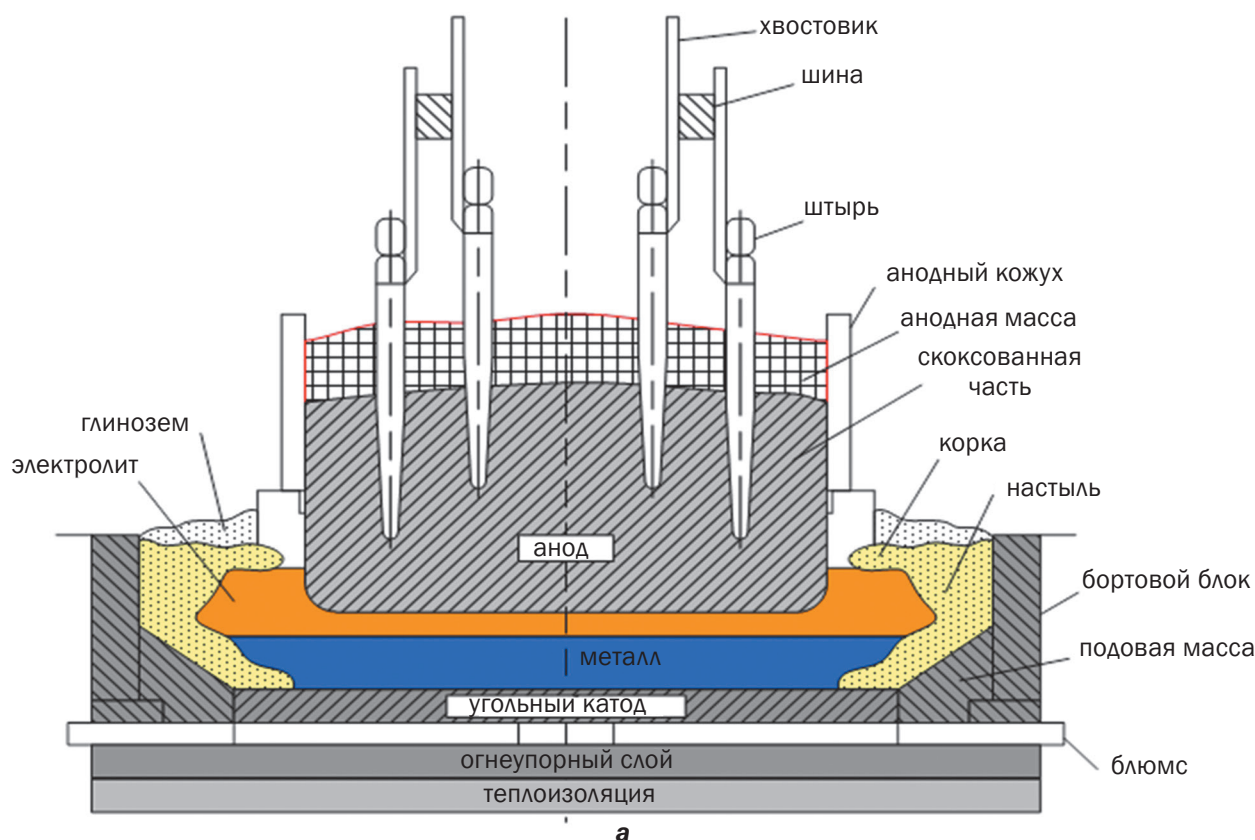


Рис. 1. Самообжигающийся анод алюминиевого электролизера с верхним токоподводом: а – электролизер с самообжигающимся анодом в разрезе; б – общий вид

Fig. 1. Self-baking anode of aluminum electrolytic cell with upper current supply: a – sectional view of the cell with a self-baking anode; b – general view

ном получении алюминия⁶. В этой связи характеристики кокса-наполнителя, качество пека и термические условия его коксования играют важную роль [20, 23].

В настоящее время технология электролиза на ваннах данного типа имеет ряд серьезных недостатков, из которых главными являются выбросы в атмосферу загрязняю-

щих веществ (диоксида углерода, смолистых и полиароматических веществ [24]), высокие удельные расходы электроэнергии (~ 16–18 тыс. кВт·ч/т) и анодной массы (~ 500 кг на 1 т алюминия). В связи с этим исследования, направленные на улучшение технологии электролиза за счет выбора оптимального состава анода, являются актуальными.

ПРОИЗВОДСТВО АНОДНОЙ МАССЫ

При производстве АМ (рис. 2) для алюминиевой промышленности, как указывалось выше, используется ограниченное количество углеродных материалов: твердые электродные коксы – нефтяной и пековый (в качестве наполнителей, основы будущего анода, см. рис. 2 а, б) и каменноугольный пек (в качестве связующего). Это связано с высокими требованиями к аноду алюминиевого производства как к участнику электрохимического процесса: низкие зольность и содержание серы, высокая механическая прочность, оптимальная плотность [25, 26]. На показатели основных характеристик анодной массы (удельное электросопротивление, механическая прочность, коэффициент текучести и др.) влияют качественные показатели исходного сырья (кокса и пека)⁵.

Основными производителями пекового кокса являются АО «АВД-Инвест», ООО «Геолого-технологическая компания», нефтяного – ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез», «Тюменский нефтеперерабатывающий завод», АО «Ангарская нефтехимическая компания». Каменноугольный пек поставляется на алюминиевые заводы АО «Алтай-кокс», АО «АВД-Инвест». Непрокаленный нефтяной кокс по своим характеристикам уступает пе-

ковому, поэтому предварительно подвергается прокаливанию во вращающихся печах барабанного типа. Процесс прокаливания производится для удаления летучих веществ и влаги, а также для уплотнения структуры кокса при воздействии высокой температуры. Основным качественным показателем прокаленного кокса является его истинная плотность, оптимальные пределы которой определяются требованиями технологического регламента.

Для получения необходимых свойств прокаленного кокса требуется соблюдать основные условия подготовки и производства:

- обеспечение равномерного поступления сырого материала в печь;
- обеспечение стабильной работы зоны прокаливания;
- постоянное поддержание заданной температуры в зоне прокаливания.

После прокалики нефтекокс охлаждается в холодильниках барабанного типа водой, подаваемой на корпус холодильника.

Каменноугольный пек – это продукт коксохимического производства, образующийся как остаток при дистилляции каменноугольной смолы при 360 °С. В настоящее время в промышленном производстве алюминия применяется только данный вид связующего, несмотря на значительное содержание в нем вредных веществ (полиароматических углеводородов, составляющих его основу и выделяющихся при коксовании в электролизерах с анодами Содерберга [24]).

Характеристики готовой анодной массы должны соответствовать требованиям и стандартам качества, представленным в табл. 1.

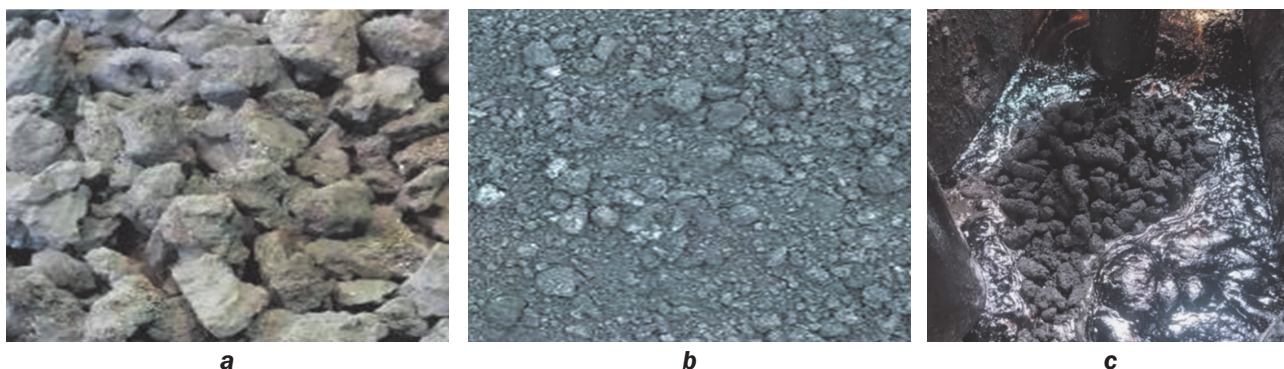


Рис. 2. Сырье для производства анодной массы: а – кокс нефтяной прокаленный; б – кокс пековый; с – готовая анодная масса

Fig. 2. Raw materials for anode paste production: а – calcined petroleum coke; б – pitch coke; с – finished anode paste

Таблица 1. Качественные характеристики анодной массы, применяемой при производстве первичного алюминия
Table 1. Qualitative characteristics of the anode paste used in the production of primary aluminum

Наименование показателя	Единица измерения	Норма для показателя	
		Анодная масса на основе:	
		пекового кокса	нефтяного кокса
Предел прочности на сжатие	МПа	не менее 30	
Удельное электрическое сопротивление	мКОм·м	не более 65	не более 70
Пористость	%	не более 28	не более 30
Общая разрушаемость в токе CO ₂	мг/см ² ·ч	не более 30	
Зольность	%	не более 0,5	
Сера	%	не более 0,5	не более 2,1
Содержание в золе:			
ванадий	%	не более 0,003	не более 0,03
натрий	%	не более 0,02	не более 0,015
железо	%	не более 0,04	
кремний	%	не более 0,04	

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ АНОДОВ НА НЕФТЯНОМ И ПЕКОВОМ КОКСАХ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ

Сравнительный анализ параметров и показателей работы проводился на электролизерах типа С-8Б(М) 2-х серий (№ 1 и 2) электролизного производства на алюминиевом предприятии, оснащённом ваннами с СА.

Нами были проанализированы данные по эксплуатации ванн с разным видом кокса в составе анодной массы, загружаемой в электролизеры. Были рассмотрены следующие показатели: выход угольной пены; удельный расход электроэнергии; количество технологических нарушений, возникающих в процессе работы электролизеров при обслуживании анода; расход сырьевых материалов на изготовление анодной массы.

Данные показатели существенным образом зависят от качества анода и его эксплуатации в процессе электролиза.

Влияние наличия угольной пены в электролите на процесс электролиза. Отличительной чертой эксплуатации ванн с СА является неизбежное образование угольной пены на поверхности электролита [27, 28], рис. 3. Она образуется в основном из-за различий в реакционной способности коксов и пека – способности взаимодействовать с оксифторидными комплексами, находящимися в криолит-глиноземном расплаве. Углерод пека окисляется быстрее, чем углерод кокса, что приводит к попаданию последнего на поверхность электролита.

Наличие значительного количества угольной пены в электролите алюминиевой ван-



Рис. 3. Угольная пена в расплаве электролита [29]

Fig. 3. Carbon skim in the electrolyte melt [29]

ны приводит к возникновению различных технологических нарушений, основные из которых [30, 31]:

- необходимость уменьшения межполюсного расстояния между анодом и катодом при заданном рабочем напряжении из-за неконтролируемого увеличения электросопротивления электролита;
- увеличение коэффициента динамической вязкости электролита, что приводит к запутыванию корольков алюминия в расплаве;
- уменьшение скорости растворения и распределения Al₂O₃, так как угольная пена препятствует его свободному распределению в электролите;
- более медленный отвод теплоты от расплава, что может привести к нарушению теплового равновесия в ванне;
- увеличение электрического сопротивления электролита, т.к. угольная пена выступает в роли изолятора [32];

– повышение температуры расплава, сопровождающееся повышенным расходом фтористых солей;

– и, как следствие повышения температуры, риск возникновения накарбизирования расплава (образования не проводящего электрический ток Al_4C_3).

В табл. 2 приведены данные по выходу угольной пены за период с июня по октябрь 2024 г. (в серии № 1 установлено 172 электролизера, в серии № 2 – 186).

Как показали наши исследования (см. табл. 2), более значительный выход угольной пены за исследуемый период преобладает на электролизерах с анодами на основе нефтяного кокса.

Расход электроэнергии. Удельный расход электроэнергии на 1 т производимого алюминия на российских заводах составляет от 14,5 до 18 тыс. кВт·ч, а для получения алюминия высокой чистоты – до 19,5 тыс. кВт·ч.

Проведенный анализ по удельному расходу электроэнергии, затраченной на 1 т Al,

представленный в табл. 3, показал, что за период с июня по октябрь 2024 г. данный показатель имеет незначительные различия. Из приведенных значений можно сделать вывод, что вид кокса в составе АМ влияет на расход электроэнергии в исследуемый период в меньшей степени. Уменьшение расхода электроэнергии за исследуемый период составило 52 кВт·ч/т Al, однако в общих затратах на выпуск единицы продукции также принесет экономическую выгоду.

Расход анодной массы и скорость сгорания анода. Анализ расхода анодной массы на нефтяном и пековом коксах на 1 т Al за период с июня по октябрь 2024 г. представлен в табл. 4.

Как видно из данных табл. 4, среднее количество израсходованного материала (анодной массы) в сутки составляет 98,53 т на электролизерах с анодами, работающих на нефтяном коксе, и 96,71 т на электролизерах с анодами, работающих на пековом коксе. Так как на анодах, работающих на нефтяном

Таблица 2. Выход угольной пены за июнь – октябрь 2024 г.
Table 2. Carbon skim output for the period from June 2024 to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)		Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)	
	Количество угольной пены, кг			
	Суммарное	На 1 электролизер	Суммарное	На 1 электролизер
Июнь	2856,0	16,6	1785,0	9,5
Июль	2894,6	16,8	1561,2	8,3
Август	2787,6	16,2	1323,7	7,1
Сентябрь	2491,0	14,4	1229,0	6,6
Октябрь	2650,1	15,4	1916,3	10,3
На 1 электролизер в среднем за период		~15,9		~8,4

Таблица 3. Показатели по удельному расходу электроэнергии за период июнь – октябрь 2024 г.
Table 3. Indicators of specific electricity consumption for the period from June 2024 to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)		Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)	
	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т Al			
	Корпус А1	Корпус Б1	Корпус А2	Корпус Б2
Июнь	15413	15373	15197	15385
Июль	15502	15473	15303	15426
Август	15336	15415	15362	15521
Сентябрь	15237	15358	15204	15363
Октябрь	15376	15458	15242	15417
Количество электроэнергии, затраченное за период, в среднем	15372	15415	15261	15422
Удельный расход электроэнергии за период на серию	15393		15341	

Таблица 4. Расход анодной массы за период июнь – октябрь 2024 г.
Table 4. Anode paste consumption for the period from June 2024 to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)	Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)
	Расход анодной массы, т	
Июнь	3340,76	3606,55
Июль	3390,78	3544,82
Август	3379,33	3591,16
Сентябрь	3367,36	3548,79
Октябрь	3470,50	3697,82
Суммарное количество АМ за период	16948,73	17989,14
Расход АМ на 1 электролизер	98,53	96,71

коксе, расход АМ больше, можно сделать вывод, что и скорость сгорания данного типа анодов будет больше, что подтверждается проведенными исследованиями и анализу данных о скорости сгорания анодов, табл. 5.

Основные технологические нарушения в работе анода. Одной из основных и главных трудоемких работ при работе электролизной ванны является обслуживание СА. Своевременное и правильное его обслуживание – одна из важных составляющих в нормальном функционировании электролизера.

Особенностью структуры самообжигающихся анодов алюминиевых электролизеров с верхним токоподводом является образование расслоения анода из-за попадания пыли в образовавшиеся полости из сквозных отверстий в теле анода. Главной причиной образования трещин в аноде являются растягивающие напряжения вследствие теплового расширения установленных холодных стальных штырей в процессе перестановки. Это приводит не только к увеличению размеров поперечных трещин, но и образованию продольных трещин. На рис. 4 приведены примеры основных технологических нарушений в работе СА.

Расслоение анода являются одной из самых серьезных проблем в работе электролизера с анодом Содерберга, оно разделяет анод на изолированные участки и препятствует равномерному распределению тока в его горизонтальном сечении. В современных условиях такие дефекты значительно снижают производительность электролизеров.

Также при обслуживании анодного устройства возникают технологические нарушения при перестановке анодных штырей (протечи пека, гажения, попадание жидкой анодной массы в расплав электролита). В табл. 6 представлена сравнительная характеристика статистических данных о частоте технологических нарушений за период с июня по октябрь 2024 г. на электролизерах с анодами, работающими на нефтяном или пековом коксе в составе АМ.

Как можно видеть из данных табл. 6, количество технологических нарушений при проведении данной технологической операции на СА, работающих на нефтяном коксе, преобладает более чем в 2 раза.

Также на рис. 5 для сравнения представлен вид подошвы анодов, сформированных из анодной массы на разном виде кокса.

Таблица 5. Скорость сгорания самообжигающихся анодов за период июнь – октябрь 2024 г.
Table 5. Self-baking anode burnout rate for the period from June 2024 to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)		Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)	
	Скорость сгорания, в среднем, см/сут			
	Корпус А1	Корпус Б1	Корпус А2	Корпус Б2
Июнь	1,48	1,53	1,46	1,53
Июль	1,50	1,55	1,49	1,46
Август	1,48	1,49	1,46	1,50
Сентябрь	1,47	1,53	1,47	1,46
Октябрь	1,48	1,55	1,46	1,47
Скорость сгорания анода, в среднем	1,50		1,47	



Рис. 4. Основные виды технологических нарушений при обслуживании самообжигающегося анода электролизера: а – выгорание боковой поверхности анода; б – отсутствие торцов и углов анода; в – наличие трещин в теле анода; д – образование сквозных отверстий и трещин под токоподводящими анодными сталеалюминевыми штырями и трещин на подошве анода; е – образование на поверхности анода лековых «карманов»; ф – осыпаемость анода

Fig. 4. Main types of technological failures during electrolytic cell self-baking anode maintenance: а – burnout of the anode side surface; б – absence of ends and corners of the anode; в – presence of cracks in the anode body; д – formation of through holes and cracks under the current-carrying anode steel-aluminum pins and cracks on the anode bottom; е – formation of pitch “pockets” on the anode surface; ф – anode crumbling

Таблица 6. Частота технологических нарушений при перестановке анодных штырей за период с июня по октябрь 2024 г.

Table 6. Frequency of process failures during the rearrangement of anode pins for the period from June to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)	Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)
Июнь	53	20
Июль	70	31
Август	37	13
Сентябрь	66	25
Октябрь	59	32
Суммарное количество технологических нарушений за период на серию	285	121

**а****б**

Рис. 5. Подошва самообжигающегося анода, сформированного из анодной массы, содержащей в качестве наполнителя: а – пековый кокс; б – нефтяной кокс

Fig. 5. The bottom of a self-baking anode formed from the anode paste containing the following filler: a – pitch coke; b – petroleum coke

Как видно из рис. 5, вид кокса в составе АМ влияет на возникновение расслоений на подошве анода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самообжигающиеся аноды алюминиевых электролизеров являются одними из главных участников процесса электролиза при производстве первичного алюминия. Качество и стабильность нормальной работы анодов зависят от ряда условий, начиная от гранулометрического состава используемого в производстве АМ сырья, условий производства и хранения АМ и заканчивая ведением технологии электролиза.

Нами был проведен сбор данных о некоторых параметрах технологического процесса на электролизерах типа С-8Б(М) с анодом Содерберга, работающих на анодной массе, в состав которой входили нефтяной или пековый кокс (на примере двух серий электролиза алюминиевого завода).

Сравнительный анализ данных при обслуживании электролизеров с СА показал, что наименьшие значения выхода угольной пены, удельного расхода электроэнергии, расхода АМ и скорости сгорания анода отвечают анодам, сформированным из АМ на основе пекового кокса.

Список источников

1. 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 // *Metallurgija*. 2017. Vol. 56. No. 1-2. P. 255–258. EDN: XDPBLL.
2. Горланов Е.С., Бричкин В.Н., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 1. Традиционные направления развития // *Цветные металлы*. 2020. № 2. С. 36–41. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.04>. EDN: UTKUVO.

3. Корнеев С.И. Алюминиевая промышленность Китая и перспективы мировой алюминиевой индустрии // Цветные металлы. 2021. № 4. С. 5–11. <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.04.01>. EDN: NLIPVD.
4. Сизяков В.М., Поляков П.В., Бажин В.Ю. Современные тенденции и стратегические задачи в области производства алюминия и его сплавов в России // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 16–23. EDN: QRECGA.
5. Zhaowen Wang, Bingliang Gao, Zhongning Shi, Xianwei Hu, Fengguo Liu, Wenju Tao, Youjian Yang Проблемы и технические решения в развитии китайской промышленности первичного алюминия // Цветные металлы и минералы – 2024: сб. тез. докл. XII Междунар. конгр. (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2024. Р. 2–11. EDN: CDPJHW.
6. Agnihotri A. Пути развития индийской алюминиевой промышленности // Цветные металлы и минералы – 2024: сб. тез. докл. XII Междунар. конгр. (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2024. Р. 12–2418. EDN: BJDQYW.
7. Горланов Е.С., Кавалла Р., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 2. Перспективные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 42–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>. EDN: JBGFYQ.
8. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В. [и др.]. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 19–30. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>. EDN: XWTXTX.
9. 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. конгр. (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2024. Р. 213–218. EDN: ZZCDFB.
10. Горланов Е.С., Сизяков В.М., Шариков Ф.Ю., Спекторук А.А., Бутакова Т.В. Проблемы и решения защиты углеграфитовых электродов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 513–537. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-513-537>. EDN: AEDFQP.
11. 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>.
12. Пинаев А.А., Радионов Е.Ю., Орлов И.А., Немчинова Н.В. Изучение особенностей магнитогидродинамики электролизёров С-8БМ (С-8Б) при модернизации алюминиевых заводов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 162–177. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-162-177>. EDN: XHFGYC.
13. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development // Light Metals. The Minerals, Metals and Materials Series / eds. C. Chesonis. Cham: Springer, 2019. P. 553–563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUYU.
14. Фризоргер В.К., Гильдебрандт Э.М., Вершинина Е.П. Мониторинг показателей работы алюминиевых электролизеров с анодом Содерберга // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 4. С. 11–14. EDN: QZRKFB.
15. 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.
16. Grjotheim K. Introduction to aluminium electrolysis: understanding the Hall-Héroult process. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 с.
17. Thonstad J. Aluminium electrolysis: fundamentals of the Hall Héroult process. Aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2001. 359 с.
18. Ветюков М.М., Цыпляков А.М., Школьников С.Н. Металлургия алюминия и магния. М.: Металлургия, 1987. 320 с.
19. Чалых В.И., Немчинова Н.В., Аюшин Б.И., Богданов Ю.В. Техничко-экономическое сравнение электролизеров с обожженными анодами и самообжигающимися анодами и верхним токоподводом // Известия вузов. Цветная металлургия. 2005. № 2. С. 21–26. EDN: JVUCFH.
20. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: Руда и металлы, 2001. 671 с.
21. Гильдебрандт Э.М., Вершинина Е.П., Фризоргер В.К. Качество анодной массы в технологии электролиза алюминия с анодом Содерберга // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 17–20. EDN: RYLGUB.
22. Сидоров О.Ф., Селезнёв А.Н. Перспективы производства и совершенствования потребительских свойств каменноугольных электродных пеков // Российский химический журнал. 2006. Т. 50. № 1. С. 16–24. EDN: GZQCPJ.
23. Ткач Е.А., Немчинова Н.В. Влияние коксопекковой композиции на качество анодов Содерберга в алюминиевом производстве // Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств: материалы XV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 23–24 апреля 2025 г.). Иркутск: ИРНТУ, 2025. С. 117–122. EDN: OSNOOR.
24. Аншиц А.Г., Куртеева Л.И., Цыганова С.И., Суздорф А.Р., Аншиц Н.Н., Морозов С.В. Сравнительная оценка эмиссии канцерогенных веществ при использовании средне- и высокотемпературных пеков в производстве алюминия в электролизерах Содерберга // Химия в интересах устойчивого развития. 2001. № 9. С. 345–352.
25. Таскина А.В., Немчинова Н.В. Аттестация стандартных образцов предприятия углеродных материалов, используемых для получения первичного алюминия // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. № 4. С. 82–88. EDN: MMVTKS.

26. Немчинова Н.В., Таскина А.В. Разработка методики определения примесей в углеродных материалах, используемых в производстве первичного алюминия // Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации (Сагиновские чтения № 12): тр. Междунар. науч.-практ. online-конф. (г. Караганда, 18–19 июня 2020 г.). Караганда: КарГТУ им. Абылкаса Сагинова, 2020. Ч. 2. С. 156–158.
27. Foosnæs T., Naterstad T., Bruheim M., Grjotheim K. Anode dusting in Hall-Heroult cells // Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production / eds. A. Tomsett, J. Johnson. 2016. Vol. 4. P. 633–642. <https://doi.org/10.1002/9781118647745.ch83>.
28. Белоусова Н.В., Шарыпов Н.А., Шахрай С.Г., Безруких А.И. Угольная пена в алюминиевом электролизере: проблемы и некоторые пути их решения // Цветные металлы. 2017. № 8. С. 43–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.06>. EDN: ZIBLAJ.
29. Bugnion L., Fischer J.-C. Effect of carbon dust on the electrical resistivity of cryolite bath // Light Metals / eds. E. Williams. Cham: Springer, 2016. Vol. 92. No. 1-2. P. 587–591. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_99.
30. Sadler B., Welch B. Reducing carbon dust? – Needs and possible directions // 9th Australasian Aluminium Smelting Technology Conference and Workshops. Terrigal, 2007. P. 1–14.
31. Perruchoud R.C., Hulse K.L., Fischer W.K., Schmidt-Hatting W. Dust generation and accumulation for changing anode quality and cell parameters // Light Metals / eds. A. Tomsett, J. Johnson. 1999. P. 649–656. <https://doi.org/10.1002/9781118647745.ch85>.
32. Gudmundsson H. Anode dusting from a potroom perspective at Nordural and correlation with anode properties // Essential Readings in Light Metals / eds. A. Tomsett, J. Johnson. Cham: Springer, 2011. P. 657–662. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_86.

References

1. 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. EDN: XDPBLL.
2. Gorlanov E.S., Brichkin V.N., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 1. Conventional areas of development. *Tsvetnye Metally*. 2020;2:36-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.04>. EDN: UTKUV0.
3. Korneev S.I. China's aluminium sector and prospects of global aluminium industry. *Tsvetnye Metally*. 2021;4:5-11. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.04.01>. EDN: NLIPVD.
4. Sizyakov V.M., Polyakov P.V., Bazhin V.Yu. Modern trends and strategic objectives in the production of aluminum and its alloys in Russia. *Tsvetnye Metally*. 2022;7:16-23. (In Russ.). EDN: QRECGA.
5. Zhaowen Wang, Bingliang Gao, Zhongning Shi, Xianwei Hu, Fengguo Liu, Wenju Tao, Youjian Yang. Problems and technical measures in the development of China's primary aluminum industry. In: *Tsvetnye metally i mineraly – 2024: sbornik tezisev dokladov XII Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals and minerals–2024: book of abstracts of the Twelfth International Congress*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2024, p. 2-11. (In Russ.). EDN: CDPJHW.
6. Agnihotri A. Charting a promising path: the evolving landscape of India's aluminium industry. In: *Tsvetnye metally i mineraly – 2024: sbornik tezisev dokladov XII Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals and minerals–2024: book of abstracts of the Twelfth International Congress*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2024, p. 12-18. (In Russ.). EDN: BJDQYW.
7. Gorlanov E.S., Kawalla R., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 2. Development prospects. *Tsvetnye Metally*. 2020;10:42-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>. EDN: JBGFYQ.
8. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., et al. Increasing covering efficiency of Soderberg cells. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;1:19-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>. EDN: XWTXTX.
9. 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– 2024: book of abstracts of the Twelfth International Congress*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2024, p. 213-218. (In Russ.). EDN: ZZCDFB.
10. Gorlanov E.S., Sizyakov V.M., Sharikov F.Yu., Spektoruk A.A., Butakova T.V. Problems and solutions to protection of carbon-graphite electrodes. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):513-00. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-513-537>. EDN: AEDFQP.
11. 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>.
12. Pinaev A.A., Radionov E.Yu., Orlov I.A., Nemchinova N.V. Analysis of the magnetohydrodynamic parameters of S-8BM (S-8B) electrolyzers in the modernization of aluminum smelters. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):162-177. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-162-177>. EDN: XHFGYC.
13. 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. The Minerals, Metals and Materials Series*. Cham: Springer; 2019, p. 553-563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUYU.

14. Frizorger V.K., Gil'debrandt E.M., Vershinina E.P. Monitoring performance of aluminum electrolyzers with Soderberg anode. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2013;4:11-14. (In Russ.). EDN: QZRKFB.
15. 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.
16. Grjotheim K. *Introduction to aluminium electrolysis: understanding the Hall-Héroult process. Introduction to aluminium electrolysis*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 1993, 260 p.
17. Thonstad J. *Aluminium electrolysis: fundamentals of the Hall Héroult process. Aluminium electrolysis*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 2001, 359 p.
18. Vetyukov M.M., Tsyplakov A.M., Shkol'nikov S.N. *Metallurgy of aluminum and magnesium*. Moscow: Metallurgiya; 1987, 320 p. (In Russ.).
19. Chalykh V.I., Nemchinova N.V., Ayushin B.I., Bogdanov Yu.V. Technical and economic comparison of electrolyzers with baked anodes and self-baking anodes and upper current carrier. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2005;2:21-26. (In Russ.). EDN: JVUCFH.
20. Yanko E.A. *Anodes of aluminum electrolyzers*. Moscow: Ruda i metally; 2001, 671 p. (In Russ.).
21. Gil'debrandt E.M., Vershinina E.P., Frizorger V.K. *Anode paste quality in aluminum electrolysis technology with Soderberg anode. Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2014;1:17-20. (In Russ.). EDN: RYLGB.
22. Sidorov O.F., Seleznyov A.N. Prospects for the production and consumer property improvement of coal tar electrode pitches. *Rossiiskij himicheskij zhurnal*. 2006;50(1):16-24. (In Russ.). EDN: GZQCPJ.
23. Tkach E.A., Nemchinova N.V. Influence of coke-pitch composition on Soderberg anode quality in aluminum production. In: *Perspektivy razvitiya, sovershenstvovaniya i avtomatizatsii vysokotekhnologichnykh proizvodstv: materialy XV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Prospects for development, improvement and automation of high-tech industries: Proceedings of the 15th All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 23–24 April 2025, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2025, p. 117-122. (In Russ.). EDN: OSNOOR.
24. Anshits A.G., Kurteeva L.I., Tsyganova S.I., Suzdorf A.R., Anshits N.N., Morozov S.V. Comparative assessment of carcinogenic emissions when using medium- and low-temperature pitches in aluminum production in Soderberg cells. *Chemistry for Sustainable Development*. 2001;9:345-352. (In Russ.).
25. Taskina A.V., Nemchinova N.V. Certification of reference materials for carbon materials used in the production of primary aluminum. *Molodezhnyy vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019;4:82-88. (In Russ.). EDN: MMVTKS.
26. Nemchinova N.V., Taskina A.V. Developing methods to determine impurities in carbon materials used in primary aluminum production. In: *Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnova realizatsii Plana natsii (Saginovskie chteniya no. 12): trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy online-konferencii = Integration of science, education and production as the basis for implementing the Nation Plan (Saginov Readings No. 12): Proceedings of the International scientific and practical online conference*. 18–19 June 2020, Karaganda. Karaganda: Abylbas Saginov Karaganda Technical University; 2020, part 2, p. 156-158. (In Russ.).
27. Foosnæs T., Naterstad T., Bruheim M., Grjotheim K. Anode dusting in Hall-Héroult cells. In: Tomsett A., Johnson J. (eds.). *Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production*. 2016, vol. 4, p. 633-642. <https://doi.org/10.1002/9781118647745.ch83>.
28. Belousova N.V., Sharypov N.A., Shakhrya S.G., Bezrukikh A.I. Coal froth in an aluminium electrolyzer: the problems and proposed solutions. *Tsvetnye Metally*. 2017;8:42-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.06>. EDN: ZIBLAJ.
29. Bugnion L., Fischer J.-C. Effect of carbon dust on the electrical resistivity of cryolite bath. In: Williams E. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2016, vol. 92, no. 1-2, p. 587-591. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_99.
30. Sadler B., Welch B. Reducing carbon dust? – Needs and possible directions. In: *9th Australasian Aluminium Smelting Technology Conference and Workshops*. Terrigal; 2007, p. 1-14.
31. Perruchoud R.C., Hulse K.L., Fischer W.K., Schmidt-Hatting W. Dust generation and accumulation for changing anode quality and cell parameters. In: Tomsett A., Johnson J. (eds.). *Essential Readings in Light Metals*. 1999, p. 649-656. <https://doi.org/10.1002/9781118647745.ch85>.
32. Gudmundsson H. Anode dusting from a potroom perspective at Nordural and correlation with anode properties In: Tomsett A., Johnson J. (eds.). *Essential Readings in Light Metals*. Cham: Springer; 2011, p. 657-662. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_86.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Немчинова Нина Владимировна,
д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nina V. Nemchinova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Ткач Евгений Александрович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
djon-ds@mail.ru

Тютрин Андрей Александрович,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
an.tu@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Бельский Сергей Сергеевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
bss@istu.edu
<http://orcid.org/0009-0009-3171-7446>

Evgenii A. Tkach,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
djon-ds@mail.ru

Andrey A. Tyutrin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
an.tu@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Sergei S. Belskii,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
bss@istu.edu
<http://orcid.org/0009-0009-3171-7446>

Заявленный вклад авторов

Немчинова Н.В. осуществляла научное руководство исследованиями и провела общее редактирование текста рукописи. Ткач Е.А. собрал экспериментальные и аналитические данные, обобщил полученные результаты. Тютрин А.А. сделал выводы по результатам исследований, осуществил графическую интерпретацию результатов исследований. Бельский С.С. провел подбор литературных источников по тематике.

Конфликт интересов

Немчинова Нина Владимировна является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.05.2025 г.; одобрена после рецензирования 27.06.2025 г.; принята к публикации 13.07.2025 г.

Authors' contribution

Nina V. Nemchinova supervised the scientific research and conducted general editing of the manuscript. Evgenii A. Tkach collected experimental and analytical data, summarized the obtained results. Andrey A. Tyutrin derived conclusions and built diagrams based on the research results. Sergei S. Belskii selected literary sources on the research topic.

Conflict of interests

Nina V. Nemchinova has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 13.05.2025; approved after reviewing 27.06.2025; accepted for publication 13.07.2025.