

РАСХОД АНОДНОЙ МАССЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АЛЮМИНИЯ

© 2022 г. А.А. Дриженко¹, С.В. Дацюра¹, А.С. Ясинский^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск, Россия

² Process Metallurgy and Metal Recycling (IME), RWTH Aachen University, Germany

Статья поступила в редакцию 04.09.21 г., доработана 25.11.21 г., подписана в печать 15.12.21 г.

Аннотация: В России большая часть алюминиевых заводов оснащена электролизерами с самообжигающимися анодами, для которых актуальна задача снижения расхода анодной массы, так как доля анодных материалов в себестоимости алюминия составляет от 8 до 20 %. Для решения этой задачи необходимо определить потребность в анодной массе. Методика расчета ее удельного расхода, используемая на предприятиях алюминиевой промышленности, имеет большую погрешность. В работе рассмотрены основные ошибки этой методики, показаны этапы вычисления расхода анодной массы, проведена оценка адекватности вычислений и даны рекомендации по ее совершенствованию. Показано, что в целом рассмотренная методика адекватно отражает процессы расхода углерода, однако конечный результат вычислений может существенно отличаться от реального. Величины, принятые постоянными для упрощения расчета, в действительности могут варьироваться в процессе электролиза, что приводит к значительному изменению конечного результата вычислений. Например, увеличение доли CO_2 с 0,45 до 0,5 приводит к уменьшению расхода анодной массы на 15,3 кг/т_{Al}. При этом известно, что при наступлении анодного эффекта состав анодных газов резко меняется: доля CO_2 сокращается, а доля CO возрастает. В летний период при высокой температуре окружающей среды увеличивается как доля испарившегося пека, так и доля анодов с повышенной температурой поверхности. Изменение последней до 0,25 приводит к повышению расхода на 6,6 кг/т_{Al}. То же самое относится к потерям при окислении на воздухе. Количество разгерметизированных электролизеров может увеличиться, а следовательно, возрастает расход углерода. Необходимо обратить внимание на факторы, влияющие на качество анода. Неправильно подобранный гранулометрический состав или износившееся оборудование могут значительно ухудшить качество анода и привести к повышению расхода углерода. Для корректного учета особенностей образования монооксида углерода необходимо внести корректировки в расчет.

Ключевые слова: расход углерода, расход анодной массы, производство алюминия, анод Содерберга, угольная пена, коксопексовая композиция, анод, электролизер Эру–Холла.

Дриженко А.А. — магистрант кафедры металлургии цветных металлов СФУ (660025, г. Красноярск, пр-т Красноярский рабочий, 95). E-mail: drizhenko@mail.ru.

Дацюра С.В. — магистрант кафедры металлургии цветных металлов СФУ. E-mail: dacyuras1970@mail.ru.

Ясинский А.С. — канд. техн. наук, зав. лабораторией физикохимии металлургических процессов и материалов СФУ, приглашенный исследователь RWTH Aachen, IME, Process Metallurgy and Metal Recycling, RWTH Aachen University (Germany, 52056, Aachen, Intzestraße 3). E-mail: ayasinskiykrsk@gmail.com.

Для цитирования: Дриженко А.А., Дацюра С.В., Ясинский А.С. Расход анодной массы при производстве алюминия. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 2. С. 25–32. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-2-25-32.

Anode paste consumption for aluminum production

A.A. Drizhenko¹, S.V. Datsyura¹, A.S. Yasinskiy^{1,2}

¹ Siberian Federal University (SibFU), Krasnoyarsk, Russia

² Process Metallurgy and Metal Recycling (IME), RWTH Aachen University, Germany

Received 04.09.2021, revised 25.11.2021, accepted for publication 15.12.2021

Abstract: In Russia, most aluminum smelters are equipped with cells with self-baking anodes featuring an urgent problem of lowering the anode paste consumption, since the share of anode materials in the cost of aluminum varies from 8 to 20 %. To solve this problem, it is necessary to determine the anode paste demand. The method for calculating the specific anode paste consumption used at aluminum smelters has a poor accuracy. The paper discusses the main errors of this method, shows the stages of anode paste consumption calculation, assesses the adequacy of calculations and gives recommendations for method improvement. It is shown that in general the considered method adequately reflects carbon consumption processes, but the final result of calculations may differ significantly from the actual one. The values taken constant to simplify the calculation, in fact, may vary during the electrolysis, which leads to a significant change in the final result of calculations. For

example, an increase in the CO_2 fraction from 0.45 to 0.5 leads to a decrease in the anode paste consumption by 15.3 kg/ton_{Al}. At the same time, it is known that the composition of anode gases changes sharply as the anode effect occurs: the CO_2 fraction decreases, and the CO fraction increases. In summer, at high ambient temperatures, the proportion of both vaporized pitch and anodes with an increased surface temperature rise. As the latter changes to 0.25, the consumption increases by 6.6 kg/ton_{Al}. The same applies to air oxidation. The number of depressurized cells may increase with the subsequent increase in the carbon consumption. It is necessary to pay attention to factors affecting the anode quality. Incorrectly selected particle size distribution or worn equipment may significantly degrade the anode quality and lead to an increase in carbon consumption. It is necessary to make adjustments to the calculation in order to consider the peculiarities of carbon monoxide formation properly.

Keywords: carbon consumption, anode paste consumption, aluminum production, Soderberg anode, carbon dust, coke-pitch composition, anode, Hall-Heroult cell.

Drizhenko A.A. — Master student, Department of metallurgy of non-ferrous metals, Siberian Federal University (SibFU) (660025, Russia, Krasnoyarsk, Krasnoyarskii Rabochii str., 95). E-mail: drizhenko@mail.ru.

Datsyura S.V. — Master student, Department of metallurgy of non-ferrous metals, SibFU. E-mail: dacyuras1970@mail.ru.

Yasinskiy A.S. — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of physics and chemistry of metallurgical processes and materials of SibFU, Guest researcher at RWTH Aachen. IME, Institute for Process Metallurgy and Metal Recycling, RWTH Aachen University (Germany, 52056 Aachen, Intzestraße 3). E-mail: ayasinskiykrsk@gmail.com.

For citation: Drizhenko A.A., Datsyura S.V., Yasinskiy A.S. Anode paste consumption for aluminum production. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 2. P. 25–32 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-2-25-32.

Введение

Алюминий — легкий металл, широко применяемый в промышленности, благодаря его физико-химическим свойствам, таким как низкая плотность, высокие коррозионная стойкость и теплопроводность. Алюминий легко поддается штамповке, обладает хорошей электропроводностью и меньшей себестоимостью по сравнению с другими высокопроводимыми металлами. В природе алюминий практически всегда встречается в виде соединений. На сегодняшний день оптимальным способом получения алюминия является метод электролиза глинозема в расплавленном криолите. Электролиз происходит на промышленных электролизерах, мощность которых составляет от 100 до 500 кА. Электролизеры бывают двух типов: с обожженными анодами (ОА) и с самообжигающимися анодами (СА), или анодами Содерберга [1, 2].

По нашим приблизительным оценкам, мировое производство алюминия на анодах Содерберга оценивается в 2 млн т [3], а это 3 % от всего полученного металла, или 7 %, если исключить количество произведенного алюминия в Китае. У электролизеров с ОА имеется ряд преимуществ [4], в том числе более низкие расходы электроэнергии на производство алюминия и фтористых солей, а также меньший объем выделений в атмосферу [5, 6], высокая механизация работы электролизера и возможность увеличения его мощности [4, 7]. При этом имеются и недостатки ОА, главные из кото-

рых — высокая стоимость, необходимость больших капиталовложений в их производство, сложность переработки анодных огарков, вследствие чего себестоимость алюминия, произведенного по технологии с обожженными анодами, на 20 % выше, чем с анодами Содерберга. Поэтому в России большая часть алюминиевых заводов оснащена электролизерами с СА. Этому поспособствовало бурное развитие алюминиевой промышленности в СССР в 1950—1980-е годы, когда и было построено большинство алюминиевых предприятий, которые сейчас сложно и дорого модернизировать.

Для электролизеров с СА актуальна задача снижения расхода анодной массы (АМ), так как доля анодных материалов в себестоимости алюминия составляет от 8 до 20 %. Для ее решения сначала необходимо определить потребность в АМ. При кажущейся простоте поставленной задачи ее выполнение оказалось затруднительным. Существующая методика определения удельного расхода АМ содержит ряд недостатков. В основном она используется для планирования расхода и объема производства анодной массы, а полученный результат вычислений показывает ее прогнозируемое количество, требуемое для производства 1 т алюминия. Чтобы оценить степень достоверности указанной методики расчета, необходимо ее подробно рассмотреть и проанализировать. Это и было целью настоящей работы.

Методика расчета удельного расхода анодной массы

Методика, применяемая на алюминиевых заводах России, основана на суммировании всех потерь углерода, возникающих в процессе производства алюминия. В основном это потери, возникающие в ходе работы электролизера: расход на основную реакцию, расход на окисление на воздухе и в токе CO_2 , расход на коксование. Помимо этого, учитываются потери углерода, возникающие при появлении примесей в АМ, и потери с кусками и пеной.

В табл. 1 представлены параметры электролиза, влияющие на расход АМ. В работе использованы значения параметров одного из российских алюминиевых заводов, оснащенного электролизерами с самообжигающимися анодами, но они характерны для всех предприятий с таким типом электролизеров.

Первым и основным параметром, влияющим на расход АМ, является выход по току (η), определяющий затраты углерода на образование алюминия по основной реакции (подробно об этом будет описано далее).

Параметр X определяет количество CO_2 в анодных газах и используется для расчета потерь углерода в токе CO_2 . На практике при расчете расхода анодной массы на российских алюминиевых заводах принимают $X = 0,45$ (предположительно это измеренное среднее значение для анода Содерберга). Под анодными газами здесь понимается смесь $\text{CO} + \text{CO}_2$ без учета воздуха и других газов, т.е. доля CO равна $1 - X$.

Еще одним статистически средним значением является параметр $A_1 = 0,035$, который определяет долю углерода, расходующуюся на окисление воздухом.

Параметр A_2 показывает потери при коксовании и вычисляется как произведение баланса пека

Таблица 1. Параметры, влияющие на расход анодной массы

Table 1. Parameters influencing anode paste consumption

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Выход по току	η	доли ед.	0,8763
		%	87,63
Содержание CO_2 в анодных газах	X	доли ед.	0,45
Потери на окисление воздухом	A_1	доли ед.	0,035
Потери при коксовании	A_2	доли ед.	0,06078
Выход пены	P	кг/ T_{Al}	38,2
Содержание С в пене	a	доли ед.	0,42
Расчетное (факт.) содержание примесей в АМ, в том числе:	b	доли ед.	0,020
		%	0,038
		%	0,010
		%	1,750
Базовое содержание:		%	0,025
		%	0,018
		%	1,55
Расчетное ΔCRR		%	1,68
Потери при протеканиях и с кусками	c	доли ед.	0,0045
Куски		т	213,9
Потребность в АМ		т	47062,3
Мех. потери	d	доли ед.	0,005
Доля пека в АМ	e	доли ед.	0,3039

Таблица 2. Статьи расхода анодной массы

Table 2. Anode paste consumption items

Статья расхода	Формула	Значение, кг/т _{Al}
Основная реакция	$Q_1 = 1000/(3\eta)$	380,4
Окисление CO ₂	$Q_2 = \{[2\eta - (1 + X)]/[3\eta (1 + X)]\} \cdot 1000$	79,4
Окисление воздухом	$Q_3 = Q_1 A_1/\eta$	15,2
Потери на коксование	$Q_4 = Q_1 A_2/\eta$	26,4
Потери с пеной	$Q_5 = Pa$	16,0
Потери с примесями	$Q_6 = Q_1 b + \Sigma(Q_V, Q_{Na}, Q_S, Q_{Ca})$	8,7
Потери при протеканиях и кусках	$Q_7 = c Q_1$	1,7
Механические потери	$Q_8 = d Q_1$	1,9
$\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8$		529,7

на 0,2 (считается, что около 20 % пека испаряется при коксовании). Балансом, или долей пека называется его процентное содержание в анодной массе.

Для расчета потерь с пеной используется параметр P — выход пены на 1 т произведенного алюминия. Пена является продуктом сгорания анода, образующаяся вследствие разной реакционной способности кокса из связующего (пека) и кокса-наполнителя [8]. Кокс из связующего окисляется значительно быстрее, что приводит к осыпанию частиц анода и попаданию их в электролит. Величина P определяется из количества вывезенной пены и вылитого металла и учитывается вместе с показателем a — количеством углерода в пене, измеренным в лаборатории.

Параметр b показывает содержание примесей в анодной массе и используется совместно с долей ванадия, натрия, серы и кальция для оценки расхода с примесями. Все эти значения рассчитываются в лаборатории и сравниваются с базовыми, которые представлены в табл. 1, согласно техническим требованиям технологического регламента производства анодной массы.

Величина c , показывающая потери при протеканиях и кусках, вычисляется как отношение количества вывезенных кусков анода и потребности в АМ, определяемой весом завезенной анодной массы за расчетный период.

Переменная d характеризует механические потери, и на практике ее принимают равной 0,005.

Величина e определяет количество связующего вещества, т.е. пека, в АМ, и ее значение изменяется в зависимости от состояния коксопечевой

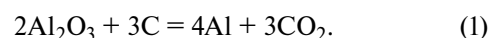
композиции (КПК) на аноде. Под состоянием КПК понимается вязкость жидкого слоя анода и количество пека в этом слое. Состояние КПК определяется технологами визуально по поверхности анода, оценивается в баллах и заносится в базу данных. Исходя из динамики оценки КПК принимается решение об изменении баланса пека в АМ. Если она в течение недели снижается и становится ниже целевого значения, значит пека в жидком слое недостаточно, и количество связующего увеличивают.

В табл. 2 представлены формулы расчета удельного расхода анодной массы и характерные значения статей расхода.

Анализ методики расчета

Планирование потребности завода в анодной массе играет важную роль при управлении алюминиевым производством, что обуславливает наличие повышенных требований к точности ее расчета. Однако существующая методика расчета, по всей видимости, не обеспечивает необходимой точности. Для того чтобы это продемонстрировать, разберем подробнее уравнения, используемые для определения отдельных статей расхода углерода.

Q_1 — теоретический минимальный расход углерода на 1 т алюминия с учетом окисления металла и выходом по току 87,63 %. Основная реакция получения алюминия имеет вид [8—10]



Отсюда рассчитывается масса углерода, необходимая для образования 1 т алюминия:

$$m_C = \frac{3M_C \cdot 1000}{4M_{Al}} = 333 \text{ кг/т}_{Al},$$

$$Q_1 = \frac{m_C}{\eta} = \frac{1000/3}{\eta} = \frac{1000}{3\eta},$$

$$Q_1 = \frac{1000}{3 \cdot 0,8763} = 380,4 \text{ кг/т}_{Al},$$

где M_C , M_{Al} — атомные массы углерода и алюминия соответственно; $\eta = 0,8763$ — выход по току, доли ед.

Рассмотрим вычисление параметра Q_2 , определяющего затраты углерода на окисление анода углекислым газом (1 т_{Al}). Для этого применим следующее уравнение:

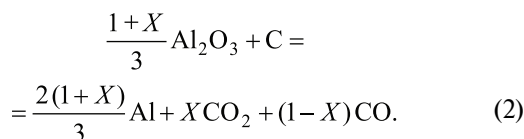
$$Q_2 = \frac{2\eta - (1 + X)}{3\eta(1 + X)} \cdot 1000 = 79,4 \text{ кг/т}_{Al},$$

где $X = 0,45$ — доля CO_2 в анодных газах.

Чтобы оценить достоверность этого результата, необходимо проанализировать методику его получения. Предположительно в расчете используется переменная, учитывающая все виды потерь углерода под коркой электролита. Обозначим ее $Q_{общ}$. Тогда Q_2 вычисляется из разности общего расхода углерода $Q_{общ}$ и расхода на основную реакцию Q_1 :

$$Q_2 = Q_{общ} - Q_1.$$

Чтобы определить общий расход углерода на образование CO и CO_2 , необходимо долю CO_2 , полученного в результате основной реакции (1), принять за X , тогда доля CO в анодных газах составит $1 - X$, а результирующая реакция примет вид



Отсюда общий расход углерода под коркой электролита равен

$$\begin{aligned} Q_{общ} &= \frac{m_C}{m_{Al}} = \frac{M_C / [2(1+X)M_{Al}]}{3} = \\ &= \frac{2}{3} \frac{1}{1+X} \cdot 1000 = 459,77 \text{ кг/т}_{Al}. \end{aligned}$$

Полученная формула не учитывает выход по току, т.е. $\eta = 100\%$. В это уравнение входят все виды потерь углерода под коркой электролита [11]. Чтобы вычислить расход углерода на окисление в токе CO_2 (Q_2), необходимо от общего расхода

$Q_{общ}$ вычесть расход углерода по основной реакции Q_1 :

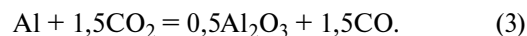
$$Q_2 = Q_{общ} - Q_1 = \frac{2}{3} \frac{1}{1+X} - \frac{1}{3\eta} = \frac{2\eta - (1+X)}{3\eta(1+X)}.$$

При этом в процессе окисления образуется газ CO . Таким образом, расход углерода на образование CO при $\eta = 0,8763$ и доле CO_2 $X = 0,45$ составит

$$Q_2 = \frac{2\eta - (1+X)}{3\eta(1+X)} \cdot 1000 = 79,4 \text{ кг/т}_{Al}.$$

Видно, что полученная нами формула расчета параметра Q_2 полностью совпала с уравнением, используемым на предприятии. Это означает, что выход по току учтен частично.

Данная модель неточно отражает суть процессов окисления углерода. При расчете Q_2 следует учитывать, что в анодных газах присутствует доля CO , образованная в результате обратных реакций окисления металла, а не путем газификации углерода. Алюминий взаимодействует с CO_2 по следующей реакции [1, 7]:



Скорость ее протекания зависит в том числе от растворимости газов CO , CO_2 и алюминия в электролите, но эта зависимость уже учтена в выходе по току. Доля CO , образованная по реакции (3), не вносит вклада в расход углерода, т.е. CO сформировался не из углерода, а из CO_2 , затраты на который мы учли при расчете Q_1 . Поэтому, если необходимо найти расход углерода на образование CO при окислении в CO_2 , следует учитывать наличие части CO , не влияющей на этот расход. Остальная и основная часть CO образуется электрохимическим путем и зависит от выхода по току. То есть сначала следует найти долю CO , образованную в результате обратных реакций (у), затем вычесть ее из общего содержания CO в анодных газах, после чего рассчитать влияние выхода по току на $Q_{общ}$ и от полученного значения вычесть затраты углерода на основную реакцию Q_1 . В итоге мы получим значение Q_2 — расход углерода на образование газа CO при окислении в CO_2 с учетом выхода по току и доли газа CO , не участвовавшего в расходе углерода.

Рассчитаем долю CO в анодных газах, которая сформировалась в результате обратных реакций.

Для этого из уравнения (3) вычислим массу СО в расчете на 1 моль алюминия:

$$m_{(\text{CO})_{\text{о.р}}} = 1,5M_{\text{CO}} = 1,5(12 + 16) = 42 \text{ г.}$$

Полученная масса СО образуется, если весь алюминий прореагирует с CO_2 . С учетом выхода по току η масса СО определяется следующим образом:

$$m_{(\text{CO})_{\text{о.р}}} = m_{(\text{CO})}(1 - h) = 5,2 \text{ г.}$$

Всего масса СО по общей реакции (1) составит

$$m_{(\text{CO})_{\text{общ}}} = (1 - X)M_{\text{CO}} = 15,4 \text{ г,}$$

а с учетом выхода по току

$$m_{(\text{CO})_{\text{общ}}} = \frac{m_{(\text{CO})_{\text{общ}}}}{\eta} = 17,6 \text{ г.}$$

Доля СО, образованного обратными реакциями в анодных газах, будет равна

$$\frac{m_{(\text{CO})_{\text{о.р}}}}{m_{(\text{CO})_{\text{общ}}}} = \frac{5,2}{17,6} = 0,3.$$

Таким образом, если общая доля СО в суммарной реакции равна $1 - X$, то при $X = 0,45$ доля, образованная обратными реакциями, составит

$$y = (1 - X) \cdot 0,3 = 0,165.$$

Тогда суммарная реакция расхода углерода на образование анодных газов, определенная через долю CO_2 , примет вид

$$\begin{aligned} & \frac{1 + X + 3y}{3} \text{Al}_2\text{O}_3 + (1 + y)\text{C} = \\ & = \frac{2(1 + X) + 6y}{3} \text{Al} + (X + 2y)\text{CO}_2 + (1 - X - y)\text{CO}. \end{aligned}$$

Рассчитаем общий расход углерода с учетом y — доли СО, образованной обратными реакциями:

$$\begin{aligned} Q_{\text{общ}} &= \frac{m_{\text{C}}}{m_{\text{Al}}} = \frac{(1 + y)M_{\text{C}}}{\frac{2(1 + X) + 6y}{3}M_{\text{Al}}} = \\ &= \frac{4}{3} \frac{1 + y}{2 + 2X + 6y} = 399,3 \text{ кг/т}_{\text{Al}}. \end{aligned}$$

Полученное значение — это расход углерода на образование анодных газов электрохимическим путем. Необходимо также учесть затраты углерода с учетом выхода по току:

$$Q_{\text{общ}/\eta} = Q_{\text{общ}}/\eta = 455,7 \text{ кг/т}_{\text{Al}},$$

тогда расход углерода на образование СО будет равен

$$Q_2 = Q_{\text{общ}/\eta} - Q_1 = 455,7 - 380,4 = 75,3 \text{ кг/т}_{\text{Al}}.$$

Полученное значение на $4,12 \text{ кг/т}_{\text{Al}}$ ниже, чем $Q_2 = 79,4 \text{ кг/т}_{\text{Al}}$, рассчитанное на предприятии.

Исследуем достоверность постоянных величин, указанных в табл. 1. Из табл. 2 видно, что в расход анодной массы существенный вклад вносят параметры Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 и Q_5 . Величина Q_1 зависит от выхода по току, который, как правило, меняется в пределах 1 %, что существенно не влияет на расход углерода. Параметр Q_5 вычисляется исходя из массы и состава вывезенной пены. Значения остальных переменных Q_2 , Q_3 и Q_4 рассчитываются с учетом потерь A_1 и A_2 , принятых для упрощения расчетов постоянными, и доли испарившегося пека (0,2). Однако эти постоянные могут варьироваться в процессе электролиза [12], что приводит к значительному изменению конечного результата вычислений расхода анодной массы. Например, увеличение доли CO_2 с 0,45 до 0,5 приводит к уменьшению величины расхода АМ на $15,3 \text{ кг/т}_{\text{Al}}$. При этом известно, что при наступлении анодного эффекта состав анодных газов резко меняется: доля CO_2 сокращается, а СО растет [9].

В летний период при высокой температуре окружающей среды объем испарившегося пека увеличивается [1, 13]. Также возрастает доля анодов с повышенной температурой поверхности, а ее изменение до 0,25 приводит к повышению расхода на $6,6 \text{ кг/т}_{\text{Al}}$. То же самое относится к потерям при окислении на воздухе. В определенное время количество разгерметизированных электролизеров может вырасти, что увеличит расход углерода [14].

Также необходимо обратить внимание на факторы, влияющие на качество анода [15, 16], и, как следствие, на переменные Q_5 и Q_7 . Это такие параметры, как гранулометрический состав анодной массы [17–19], а также оборудование для производства АМ [20–23]. Неправильно подобранный гранулометрический состав или износившееся оборудование могут значительно ухудшить качество анода и привести к увеличению расхода углерода. Поэтому необходимо регулярно проводить ревизию в цехе производства АМ.

Материал статьи не предполагает получение экономического эффекта, потому что трудно оценить затраты предприятия на некорректный план производства анодной массы. Она изготавливает-

ся в течение всего прогнозного периода, и в случае производственной необходимости план корректируется. Однако методика расчета подробно описывает статьи расхода углерода, что позволяет определить места его возможного снижения путем оптимизации производственного процесса. Подсчитано, что при снижении расхода АМ на 5 кг/т_{Al} себестоимость 1 т алюминия снизится на 83,62 руб., или на 0,1 %. При годовой производительности предприятия в 1 млн т алюминия затраты на производство уменьшатся на 83 620 000 руб. В случае повышения расхода анодной массы на 5 кг/т_{Al} затраты вырастут на указанную сумму.

Заключение

В целом рассмотренная методика расчета расхода анодной массы адекватно отражает процессы расхода углерода. Однако в статье показано, что конечный результат вычислений может существенно отличаться от реального.

При использовании данной методики необходимо регулярно измерять содержание CO₂ в анодных газах, количество испаряемого пека, углерода в пене, примесей в АМ, а также учитывать летний и зимний периоды, количество разгерметизированных электролизеров, гранулометрический состав анодной массы, состояние оборудования для ее производства. Для корректного учета особенностей образования СО необходимо внести корректировки в расчет затрат углерода на окисление анода углекислым газом (Q₂).

Работа выполнена лабораторией низкоуглеродной металлургии и энергетики в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» организации-участника НОЦ «Енисейская Сибирь» в рамках национального проекта «Наука и университеты», номер проекта FSRZ-2021-0010.

Acknowledgments: *The research was conducted by the low-carbon metallurgy and energy laboratory as part of the government task of the Siberian Federal University, a member organization of the Yenisey Siberia REC, as part of the national project «Science and Universities», Project № FSRZ-2021-0010.*

Литература/References

1. Янко Э.А. Производство алюминия. Пособие для мастеров и рабочих цехов электролиза алюминиевых заводов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007.
Janko E.A. Aluminum production: A grant for masters and working electro-winning facilities of aluminum plants. S. Pb.: St. Petersburg University, 2007 (In Russ.).
2. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: Руда и металлы, 2001.
Janko E.A. Anodes of aluminum electrolyzers. Moscow: Ruda i metally, 2001 (In Russ.).
3. Barber M., Aalton T.T. The evolution of soderberg aluminum cell technology in north and south america. *JOM*. 2014. Vol. 66. No. 2. P. 223–234.
4. Колодин Э.А., Сverdlin В.А., Свобода Р.В. Производство обожженных анодов алюминиевых электролизеров. М.: Металлургия, 1980.
Kolodin E.A., Sverdlin V.A., Svoboda R.V. Production of the burned anodes of aluminum electrolyzers. Moscow: Metallurgiya, 1980 (In Russ.).
5. Gautam M., Pandey B., Agrawal M. Carbon footprint of aluminum production: Emissions and mitigation. *Environmental Carbon Footprints Industrial Case Studies*. 2018. P. 197–228.
6. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch J.B. Aluminum production in the times of climate change: The global challenge to reduce the carbon footprint and prevent carbon leakage. *JOM*. 2020. Vol. 72. P. 296–308.
7. Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Металлургия алюминия. Технология, электроснабжение, автоматизация [Электронный ресурс]: Уч. пос. для вузов. 4-е изд. М.: Флинта, 2017.
Galevsky G.V., Kulagin N.M., Mintsis M.Ya., Sirazutdinov G.A. Metallurgiya of aluminum. Technology, power supply, automation [Electronic resource]. Moscow: Flinta, 2017 (In Russ.).
8. Shimanskii A., Yasinskiy A., Yakimov I., Losev V., Buyko O., Malyshev A., Kazantsev Ya. Aluminum smelting carbon dust as a potential raw material for gallium and germanium extraction. *JOM*. 2021. Vol. 73. P. 1103–1109.
9. Азизов Б.С., Мирпочаев Х.А., Бахретдинов Р.М. О механизме протекания электродных процессов на угольном аноде при электролитическом производстве алюминия. *Докл. АН Респ. Таджикистан*. 2012. Т. 55. No. 2. С. 156–162.
Azizov B.S. Mirpochayev H.A., Bakhretdinov R.M. About the mechanism of course of electrode processes on the coal anode by electrolytic aluminum production. *Doklady Akademii Nauk Respubliki Tajikistan*. 2012. Vol. 55. No. 2. P. 156–162 (In Russ.).
10. Зельберг Б.И., Рагозин Л.В., Баранцев А.Г., Ясевич О.И., Григорьев В.Г., Баранов А.Н., Кондратьев В.В. Справочник металлурга. Производство алюминия и сплавов на его основе. Иркутск: ИРНИТУ, 2015.
Zelberg B.I., Ragozin L.V., Barantsev A.G., Yasevich O.I., Grigoriev V.G., Baranov A.N., Kondratyev V.V. Reference

- book by the metallurgist. Aluminum production and alloys on its basis. Irkutsk: IRNITU, 2015.
11. Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н. Электрометаллургия алюминия и магния. М.: Металлургия, 1987.
Vetyukov M.M., Tsyplakov A.M., Shkolnikov S.N. Elektrometallurgiya of aluminum and magnesium. Moscow: Metallurgiya, 1987 (In Russ.).
 12. Азизов Б.С., Муродиён А., Мирпочаев Х.А., Кабиров Ш.О., Сафиев Х. Влияние плотности тока и температуры электролита на состав анодных газов и удельный расход углерода при производстве алюминия. Докл. АН Респ. Таджикистан. 2015. Т. 58. No. 12. С. 1134—1139.
Azizov B.S., Murodiyev A., Mirpochayev H.A., Kabirov Sh.O., Safiyev H. Influence of density of current and temperature of electrolyte on composition of anode gases and a specific consumption of carbon by production of aluminum. Doklady Akademii Nauk Respubliki Tajikistan. 2015. Vol. 58. No. 12. P. 1134—1139.
 13. Галевский Г. В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я. Экология и утилизация отходов в производстве алюминия: Учеб. пос. для вузов. М.: Флинта, Наука, 2005.
Galevsky G.V., Kulagin N.M., Mintsis M.Ya. Ecology and recycling in production of aluminum. Moscow: Flinta, Nauka, 2005 (In Russ.).
 14. Гильдебрандт Э.М., Вершинина Е.П., Фризоргер В.К. Защита поверхности анода алюминиевого электролизера от окисления. Журн. СФУ. Техника и технологии. 2010. No. 3. С. 272—282.
Gildebrandt E.M., Vershinina E.P., Frizorger V.K. Protection of a surface of the anode of the aluminum electrolyzer against oxidation. Journal of SibFU. Tekhnika i tehnologiya. 2010. No. 3. P. 272—282 (In Russ.).
 15. Sommerseth C., Thome R.J., Rorvik S., Sandnes E., Ratvik A.P., Lossius L.P., Linga H., Svensson A.M. Spatial methods for characterising carbon anodes for aluminium production. Light Metals. 2015. P. 1141—1146.
 16. Piskazhova T.V., Polyakov P.V., Sharypov N.A., Krasovitsky A.V., Sorokin S.A., Piskazhova T.V. Multivariate statistical investigation of carbon consumption for hss reduction cell. Light Metals. 2012. P. 643—647.
 17. Belousova O.V., Kostina K.V. The analysis of the influence of manufacturing practice of anode paste on its consumption. Trans. Metall. 2020. Vol. 64. No. 7. P. 21—26.
 18. Feshchenko R.Yu., Feshchenko E.A., Eremin R.N., Erokhina O.O., Dydin V.M. Analysis of the anode paste charge composition. Metallurgist. 2020. Vol. 64. No. 7-8. P. 615—622.
 19. Furquim B.D., Pomarico W., Ferraço F., Fernandes R.S., Maestrelli S.C. Aggregate particle size distribution optimization for Soderberg anode paste production applied to aluminum industry. Mater. Sci. Forum. 2014. Vol. 802. P. 291—296.
 20. Perez S.P., Perez S.P., Doval-Gandoy J., Ferro A., Silvestre F. Quality improvement for anode paste used in electrolytic production of aluminium. Fourtieth IAS Annual Meeting: Conference Record of the 2005 Industry Applications. 2005. P. 523—528.
 21. Shakhrai S.G., Sharypov N.A., Belyanin A.V. Increasing the efficiency of the impregnation of coke with pitch in the production of anode paste for aluminum cells. Metallurgist. 2015. Vol. 58. No. 11-12. P. 1046—1048.
 22. Einar Saue N., Ystgaard J.O., Johannessen J.-I., Meier M.W., Perruchoud R.C. Improvement of anode paste quality and performance of alcoa lista. Light Metals. 2012. P. 1159—1163.
 23. Kolodin É.A., Sverdlin V.A. Use of petroleum pitches in production of anode paste and baked anodes. Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 1982. Vol. 18. P. 392—394.