



## Изучение влияния параметров процесса электролиза на основные технико-экономические показатели работы ванн ОА-300М

© А.А. Тютрин, Н.В. Немчинова, А.А. Володькина

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – изучение влияния параметров процесса электролиза (криолитового отношения, температуры электролита и содержания фторида кальция в расплаве) на основные технико-экономические показатели работы ванн с обожженными анодами ОА-300М на силу тока 313 кА. Проведение в течение месяца комплексных замеров технологических параметров (температуры расплава, уровней металла и электролита) и оценка их влияния на выход по току и удельный расход электроэнергии 5 электролизеров осуществлялись в филиале ПАО «РУСАЛ Братск» г. Шелехов. Целевые значения параметров для корпуса электролиза рассчитывались как среднее арифметическое индивидуальных целевых значений параметров работающих электролизеров корпуса. Заданное напряжение на ваннах поддерживалось равным 3,92 В. Комплексный замер параметров производился через каждые 34 ч. Отбор проб электролита для определения криолитового отношения производили через три дня – на четвертый – в процессе проведения комплексного замера. Основные технико-экономические показатели исследуемых электролизеров составили выход по току 89,1–99,7%, удельный расход технологической электроэнергии 11941–13361 кВт·ч/т. Установлено, что только два электролизера из пяти в период исследований характеризовались стабильным технологическим режимом и производительностью, следовательно, поддерживаемые на них значения основных параметров являются оптимальными. При электролизе криолит-глиноземных расплавов на электролизерах ОА-300М можно достигнуть высоких значений выхода по току (97,1–99,7%), наименьшего удельного расхода технологической электроэнергии (11941–12260 кВт·ч/т) при криолитовом отношении, поддерживаемом в пределах 2,21–2,35, температуре электролита в интервале 954–968°C и содержании  $\text{CaF}_2$  в расплаве ~ 5%. Поскольку на данном типе электролизеров фторид кальция образуется в электролите из оксида кальция, попадающего в процесс с сырьем (глиноземом), то необходимо контролировать в нем содержание СаО.

**Ключевые слова:** металлургия алюминия, электролиз криолит-глиноземных расплавов, температура электролита, криолитовое отношение, уровни металла и электролита, выход по току

**Информация о статье:** Дата поступления 22 июня 2020 г.; дата принятия к печати 30 июля 2020 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2020 г.

**Для цитирования:** Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Володькина А.А. Изучение влияния параметров процесса электролиза на основные технико-экономические показатели работы ванн ОА-300М. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 4. С. 906–918. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-906-918>

## Effects of electrolysis parameters on the technical and economic performance indicators of OA-300M baths

Andrey A. Tyutrin, Nina V. Nemchinova, Anna A. Volodkina

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** This work estimates effects of the key electrolysis parameters (bath ratio, electrolyte temperature and the content of calcium fluoride in the melt) on the technical and economic performance indicators of baths with burned anodes OA-300M at the current strength of 313 kA. During one month, complex measurements of technological parameters (melt temperature, metal and electrolyte levels) and the assessment of their impact on the current output and specific power consumption of 5 electrolysis baths were carried out at the branch of RUSAL Bratsk PJSC in Shelekhov. The target values of parameters for the electrolysis housing were calculated as the arithmetic mean of individual target values of the parameters of the working housing electrolysis baths. The specified bath voltage was maintained at 3.92 V. The complex measurement of parameters was performed every 34 hours. Electrolyte sampling to determine the bath ratio

was conducted on every fourth day, in the process of carrying out complex measurements. The main technical and economic indicators of the studied electrolysis baths were the current output of 89.1–99.7%, as well as the specific consumption of technological electricity 11,941–13,361 kWh/t. It was found that only 2 out of 5 electrolysis baths under study were characterized by a stable technological mode and performance; therefore, the values of their main parameters were optimal. During the electrolysis of cryolite-alumina melts using OA-300M electrolysis baths, it became possible to achieve high values of current output (97.1–99.7%), the lowest specific consumption of technological electricity (11,941–12,260 kWh/t) at the bath ratio maintained within 2.21–2.35, the electrolyte temperature in the range of 954–968 °C and the content of CaF<sub>2</sub> in the melt ~ 5%. Since this type of electrolysis bath forms calcium fluoride in the electrolyte from calcium oxide entering the process with the raw material (alumina), it is necessary to control the content of CaO.

**Keywords:** aluminium metallurgy, electrolysis of cryolite-alumina melts, electrolyte temperature, bath ratio, metal and electrolyte levels, current output

**Information about the article:** Received June 22, 2020; accepted for publication July 30, 2020; available online August 31, 2020.

**For citation:** Tyutrin AA, Nemchinova NV, Volodkina AA. Effects of electrolysis parameters on the technical and economic performance indicators of OA-300M baths. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(4):906–918. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-906-918>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

По объемам производства алюминий занимает ведущие позиции во всем мире [1–3] благодаря уникальным свойствам металла: малой плотности, высоким электропроводности и коррозионностойкости.

Доминирующее положение по производству цветных металлов в России занимает алюминиевая промышленность, являясь динамично развивающейся отраслью металлургии [4]. Однако при сегодняшней действительности нестабильной ситуации на внешнем рынке сбыта крупнейшая и единственная российская компания «РУСАЛ» вынуждена искать новых потребителей алюминиевой продукции. Деятельность предприятий и исследовательских организаций направлена на улучшение экологических показателей основных технологических процессов [5, 6], расширение сырьевой базы для производства глинозема [7, 8], повышение эффективности электролиза криолит-глиноземных расплавов [9, 10].

Единственным известным промышленным способом получения алюминия является электролиз криолит-глиноземных расплавов<sup>1</sup> [11, 12]. В мировой алюминиевой промышленности металл получают на электролизе-

рах, оснащенных предварительно обожженными анодами (ОА), являющимися экономически и экологически более выгодными, по сравнению с более распространенным типом ванн на российских предприятиях – с анодом Содерберга.

Основные технико-экономические показатели (ТЭП) при производстве алюминия электролитическим способом на ваннах с ОА лежат в следующих пределах: удельный расход электроэнергии ( $W_{y\partial}$ ) – 11,5–14,0 МВт·ч/т, выход по току ( $\eta_T$ ) – 94–96% [9]. Более высокие значения ТЭП не достигаются из-за потерь металла, связанные в основном со вторичными потерями алюминия (обратными реакциями взаимодействия выделившегося на катоде металла с растворенными в электролите анодными газами)<sup>1</sup>.

Для протекания процесса электролиза в нормальном технологическом режиме необходимо выдерживать параметры технологического процесса (криолитовое отношение (КО), температуру электролита ( $T_{эл}$ ), уровень металла ( $H_{Me}$ ), уровень электролита ( $H_{эл}$ ), содержание CaF<sub>2</sub> и др.) в установленных пределах. При несоблюдении предписанных для параметров процесса электролиза норм происходит ухудшение ТЭП. Для их поддержания на должном уровне необходимо осу-

<sup>1</sup>Гринберг И.С., Зельберг Б.И., Чалых В.И., Черных А.Е. Электрометаллургия алюминия: учеб. пособ. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 350 с.

ществлять своевременный контроль [13].

## 2. ТЕМПЕРАТУРА ЭЛЕКТРОЛИТА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОЛИЗА

Температура и перегрев электролита являются важным фактором для осуществления процесса электролиза [14, 15]. Обычная  $T_{эл}$  находится в диапазоне 950–960°C. С повышением температуры  $\eta_m$  падает, т.к. возрастает скорость обратного растворения алюминия в электролите<sup>1</sup>.

Очень важно иметь минимальный перегрев электролита, от которого и зависят многие показатели работы электролизера. Чтобы получить хорошие ТЭП при электролизе, температура и, соответственно, перегрев электролита должны поддерживаться на заданном уровне. Для современных электролизеров большой мощности с ОА и с точечным питанием глиноземом [16] перегрев электролита должен находиться в пределах 5–10°C, в то время как для ванн с поточной системой обработки (ванн с самообжигающимися анодами) эта величина может достигать 20°C.

Переохлаждение электролита также недопустимо, так как при этом резко ухудшается растворимость глинозема и увеличивается частота анодных эффектов (АЭ). При чрезмерно высокой  $T_{эл}$ , напротив, существенно повышается растворимость алюминия в электролите и активируется его окисление при взаимодействии с растворенными анодными газами, что ведет к снижению  $\eta_m$ .

Для протекания процесса электролиза в нормальном технологическом режиме требуется некоторый перегрев электролита относительно его точки плавления (температуры ликвидуса). Температура на ванне во время работы постоянно меняется. И если работать без перегрева (на температуре ликвидуса), то постоянно будут возникать ситуации, когда температура расплава будет опускаться ниже ликвидуса, то есть начнется кристаллизация (затвердевание) электролита. Чтобы этого не происходило, задают перегрев, создается определенный «запас прочности» на технологические отклонения температуры. Таким образом, температура процесса – это

температура ликвидуса плюс перегрев. Соответственно, перегрев электролита – разность между рабочей  $T_{эл}$  и температурой ликвидуса. По технологическому регламенту перегрев составляет 10°C, хотя в некоторые периоды работы ванны перегрев может быть значительно большим. Режим работы с наименьшим перегревом наиболее экономичен, так как чем ниже температура, тем меньше затраты электроэнергии, меньше расход тепла и фтористых солей за счет испарения, и тем выше производительность электролизера.

Однако снижать  $T_{эл}$ , и, следовательно, температуру процесса можно лишь до определенных пределов. Плотность алюминия при комнатной температуре составляет 2,7 г/см<sup>3</sup>, криолита – 2,95 г/см<sup>3</sup>. При температуре процесса 950–960°C плотность алюминия снижается и составляет ~ 2,3 г/см<sup>3</sup>, а криолит-глиноземного расплава (электролита) – 2,1 г/см<sup>3</sup>. Разницы между этими величинами достаточно, чтобы алюминий находился на подине электролизера. При снижении температуры плотность электролита растет быстрее, чем металла, и может наступить момент, когда значения их плотностей станут близкими. Тогда произойдет перемешивание алюминия с электролитом, и металл всплывет на поверхность, при этом процесс электролиза прекратится<sup>1</sup>. Считается, что разность плотностей металла и электролита не должна быть меньше 0,2 г/см<sup>3</sup>.

По данным А.И. Беляева, повышение температуры электролита на каждые 2°C (в пределах 948–959°C) приводит к снижению  $\eta_T$  на 1%. Б. Вэлч [17] и др. установили, что снижение  $\eta_T$  при увеличении температуры составляет 0,63% на 1°C, по другим данным – 0,29% на 1°C [18]. Эта зависимость может несколько меняться для того или иного типа электролизера и особенностей технологии, однако характер влияния температуры на  $\eta_T$  сохраняется. Отсюда возникает важное для заводской практики правило – работать при возможно низкой температуре электролита. Однако чрезмерное снижение температуры может вызвать повышение вязкости электролита, а также образование глиноземных

осадков из-за снижения растворимости глинозема [19–22].

### 3. ОТБОР ПРОБ ЭЛЕКТРОЛИТА И ПРОВЕДЕНИЕ ЗАМЕРОВ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Ведение технологии электролиза на ваннах ОА-300М подразумевает проведение основных технологических операций в следующей последовательности, приведенной в табл. 1, с повторением через каждые 32–40 ч. Это зависит от цикла замены ОА, пересчет которого производится по результатам анализа динамики изменений массы и габаритов анодных огарков.

К технологическому циклу работы предъявляются следующие важные требования:

- основные технологические операции должны выполняться в следующей последовательности: технологические замеры, перетяжка анодной рамы (по необходимости), выливка металла, замена ОА, укрытие замененных анодов;

- операции по замерам  $H_{Me}$ , уровня и температуры электролита, должны осуществляться в один технологический цикл;

- максимальный промежуток времени между замером  $H_{Me}$  на электролизере и его корректировкой (выливкой) не должен быть более 12 ч;

- промежуток времени между установкой в электролизер новых анодов и их укрытием должен быть не ранее чем через 1 ч и не позднее чем через 4 ч;

- промежуток времени между выливкой металла и заменой ОА на электролизере должен быть не менее 1 ч и не более 12 ч.

Необходимо более подробно рассмотреть операцию – технологические замеры – замеры уровней металла и электролита, температуры электролита. Назначение замера – получение информации о температуре электролита для поддержания постоянного теплового баланса. Управление осуществляется в автоматическом режиме изменением заданного напряжения электролизера при отклонении  $T_{эл}$  от целевых значений.

**Измерение температуры** электролита на алюминиевых предприятиях чаще всего выполняется цифровыми термометрами (рис. 1), предназначенными для измерения  $T_{эл}$ , которые обеспечивают полную погрешность измерения температуры до 1000°C не выше  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Разрешается применение других приборов, имеющих технические характеристики не ниже указанных и прошедших калибровку в сертифицированных службах.

В качестве датчиков для измерений температуры электролита применяются преобразователи термоэлектрические (рис. 2).

Приспособление для измерения  $T_{эл}$  применяется для удобной эксплуатации средств измерения и устойчивого соединения прибора с термопарой. Состоит из поллой трубки, соединенной с термопарой посредством зажима типа «цанга» (рис. 3). Материал поллой трубки для соединения термопары с прибором – нержавеющая сталь марки 12X18H10T с диаметром 14 мм, толщина стенки составляет 1,5 мм.

**Таблица 1.** Последовательность выполнения операций при 32–40-часовом технологическом цикле работы

**Table 1.** Sequence of operations for a 32–40 hour process cycle

Технологический цикл	Перечень операций
32–40 ч	Технологические замеры
	Заправка бункеров автоматической подачи фтористых солей
	Перетяжка анодной рамы
	Выливка металла, корректировка уровня электролита
	Замена обожженных анодов
	Укрытие замененных анодов

**Измерение уровня металла** производят для формирования задания на выливку алюминия с целью приведения данного параметра к целевому значению для поддержания постоянного энергетического и массового балансов электролизера.

Измерение  $H_{Me}$  и  $H_{эл}$  необходимо производить за 4–8 ч до начала выливки металла в группе электролизеров и не ранее чем через 2 ч после АЭ. Полученную информацию вво-



Рис. 1. Цифровые термометры  
Fig. 1. Digital thermometers

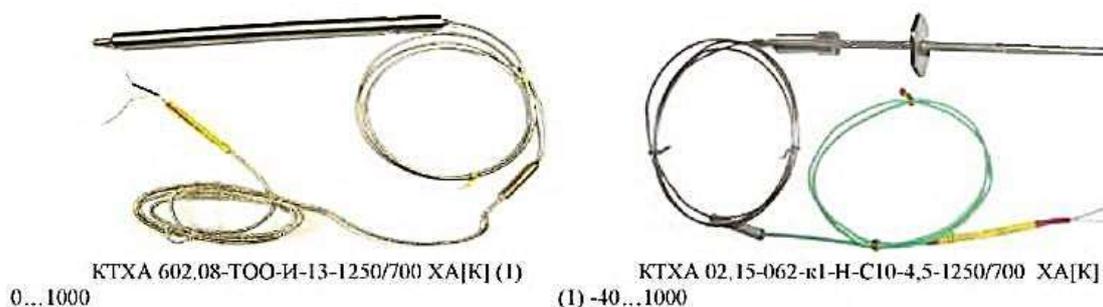


Рис. 2. Преобразователи термоэлектрические  
Fig. 2. Thermoelectric converters



Рис. 3. Приспособление для измерения температуры  
Fig. 3. Temperature measuring device

дят в базу данных. В случае получения отклонения результатов на 3–4 см от целевого значения производится повторный замер. Замер уровней металла и электролита необходимо производить с лицевого торца электролизера репером и линейкой согласно

схеме измерения (рис. 4).

**Отбор проб электролита.** В процессе работы электролизера составляющие электролита расходуются на электрохимическое взаимодействие, испаряются, уносятся с пылью и газами в систему газоочистки<sup>1</sup> [12].

Следовательно, постоянно меняется отношение числа мольных долей  $\text{NaF}$  к числу мольных долей  $\text{AlF}_3$  в электролите ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), поэтому требуется корректировка состава электролита для поддержания КО в требуемом диапазоне, поскольку данный показатель является важным для функционирования электролизера [23].

Назначение отбора проб – получение информации по составу электролита для поддержания его постоянного состава. Отбор проб электролита (рис. 5) производится с лицевого торца электролизера.

Проба электролита не должна содержать частицы глинозема, включения угольной пены и алюминия. Пробы отбирают предварительно прогретым пробоотборником для электролита (рис. 6).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На исследуемых нами 5 электролизерах с ОА в филиале ПАО «РУСАЛ Братск» г. Шелехов в течение месяца были произведены измерения  $H_{\text{Me}}$ ,  $H_{\text{эл}}$ ,  $T_{\text{эл}}$ , а также был произведен отбор проб электролита для определения КО и содержания  $\text{CaF}_2$ . Целевые значения параметров, приведенные в табл. 2, для корпуса электролиза рассчитываются как

среднее арифметическое индивидуальных целевых значений параметров работающих электролизеров корпуса.

Допустимые значения отклонений (интервалы варьирования или коридоры допусков) технологических параметров ванн приведены в табл. 3.

Для протекания процесса электролиза в нормальном режиме требуется поддержание рабочего напряжения при нижней и верхней границах заданного напряжения равного 3,92 В. Целевые значения и допустимые отклонения длительности гашения и частоты АЭ приведены в табл. 4.

Выбор цикличности проведения замеров производился исходя из выбора действующего цикла замены ОА: он составляет 28,3 сут (рассчитывается согласно регламенту изменения цикла замены анодов). Затем данное значение делится на 20 (количество анодов на одном электролизере ОА-300М) и умножается на 24 (количество часов в сутках). Отсюда комплексный замер необходимо производить через каждые 34 ч. Необходимо учесть, что от соблюдения периодичности проведения замеров, правильного выполнения операций комплексного замера, а также отбора проб электролита зависит точность измерений и, соответственно, результат наших исследований.

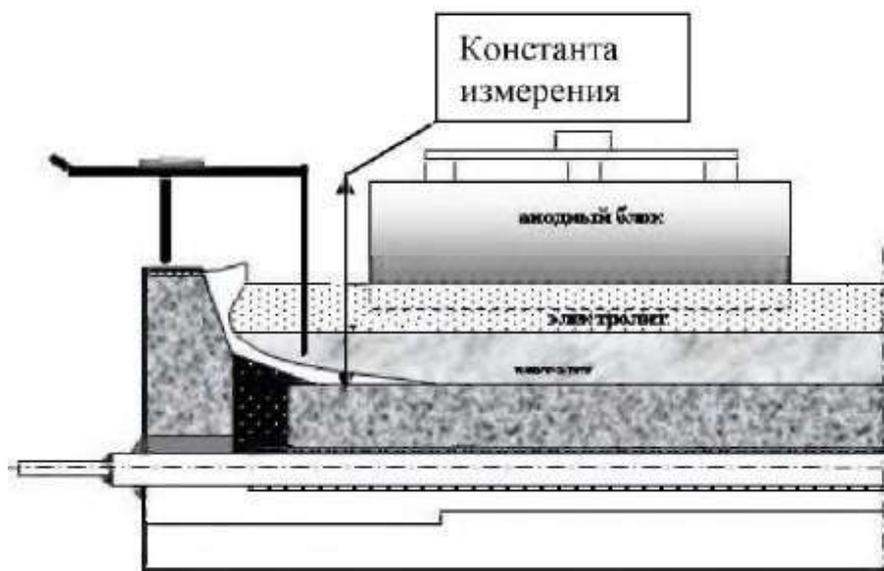


Рис. 4. Схема измерения  
Fig. 4. Measurement circuit



Рис. 5. Отбор проб электролита  
Fig. 5. Electrolyte Sampling



Рис. 6. Пробоотборник электролита  
Fig. 6. Electrolyte probe

**Таблица 2.** Целевые значения параметров электролизеров  
**Table 2.** Target values of electrolyzer parameters

Параметр	Единица измерения	Значение
$H_{Me}$	см	18 (базовое)
$H_{эл}$	см	17 (базовое)
Криолитовое отношение	–	2,28
Содержание $CaF_2$	%	4,95
$T_{эл}$	°C	961
Высота укрытия анодного массива	см	20

Дополнительная корректировка электролита по содержанию  $CaF_2$  не проводилась: в процесс поступал глинозем, содержащий оксид кальция.

Отбор проб электролита производили через три дня – на четвертый – в процессе проведения комплексного замера.

На основе результатов измерений были построены диаграммы состояния параметров работы ванн, изображенные на рис. 7. Т.е. коридоры допусков целевых значений для

этих ванн на период исследования были одинаковы.

**Таблица 3.** Допустимые отклонения для технологических параметров  
**Table 3.** Permissible variations of technological parameters

Параметр	Единица измерения	Допустимое отклонение по электролизеру	Допустимое отклонение по корпусу
$H_{Me}$	см	$\pm 1$	$\pm 0,4$
$H_{эл}$	см	$\pm 2$	$\pm 0,6$
Криолитовое отношение		$\pm 0,10$	$\pm 0,05$
Содержание $CaF_2$	%	$\pm 0,3$	$\pm 0,1$
$T_{эл}$	°C	$\pm 8$	$\pm 2$
Высота укрытия анодного массива	см	$\pm 2$	$\pm 1$

Из диаграммы состояния параметров работы электролизера № 1 (см. рис. 7) видно, что в течение месяца ванна работала нестабильно: зафиксировано дважды повышение  $T_{эл}$  и  $H_{эл}$ , и, как следствие, дважды снижение

$H_{Me}$ . Соответственно, дважды необходимо изменить на ванне задание на выливку алюминия. Что касается значения КО, то этот параметр имел значения в интервале 2,33–2,44. КО дважды имело значение выше верхнего предела допустимого значения (2,38), чем и объясняется повышение  $T_{эл}$  и  $H_{эл}$ . Для приведения электролизера к нормальному технологическому режиму необходимо снизить КО: увеличить добавку в электролит  $AlF_3$ , слить часть электролита и охладить расплав электролита обратным электролитом (с пониженной температурой).

Для электролизеров № 2–5 были построены аналогичные кривые значений параметров работы ванн в определенный период замеров.

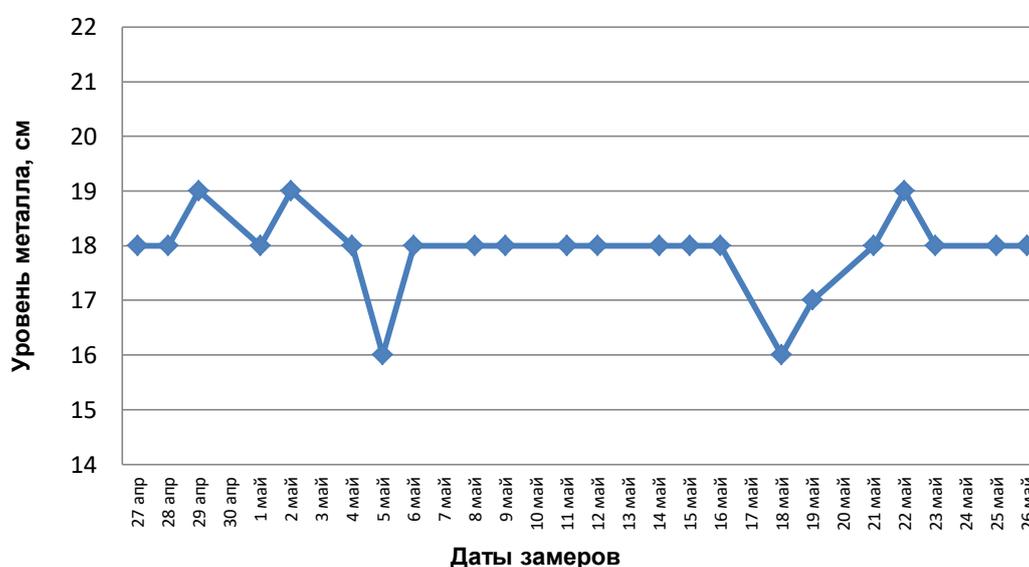
Работа электролизера № 2 была стабильной, без отклонений от установленных в технологической инструкции значений уровня и температуры электролита.  $H_{Me}$  был всегда стабильно высоким, что способствовало увеличению задания на выливку алюминия. КО в

исследуемый промежуток времени имело низкие значения (2,20–2,30), но не выходило за пределы коридора варьирования. Значение температуры электролита колебалось в диапазоне 954–962°C. Отрицательным фактором для работы данного электролизера явилось периодическое приближение значения  $H_{эл}$  к критически низкому значению, что могло бы привести к негативным последствиям при электролизе. Поэтому для поддержания значения данного параметра в необходимых пределах приходилось использовать сырье для наплавления (увеличения объема) электролита – криолит с избытком фтористого алюминия.

Технологическая работа электролизера № 3 была крайне нестабильна. Значения КО находились в очень низких пределах (в интервале 2,16–2,22), при нижнем пределе данного показателя 2,18;  $H_{эл}$  имел критически низкие значения;  $T_{эл}$  периодически отклонялась от заданного значения в обе стороны от установленного значения;  $H_{Me}$  довольно

**Таблица 4.** Целевые значения и допустимые отклонения длительности гашения и частоты анодных эффектов  
**Table 4.** Target values and permissible variations of quenching duration and anode effects frequency

Частота анодных эффектов, шт. на электролизер в сут		Длительность гашения анодных эффектов на одном электролизере, не более, с	Сила тока, кА	
Целевое значение	Допустимое отклонение		Целевое значение	Допустимое отклонение
0,1	±/0,1	120	313	±/-1



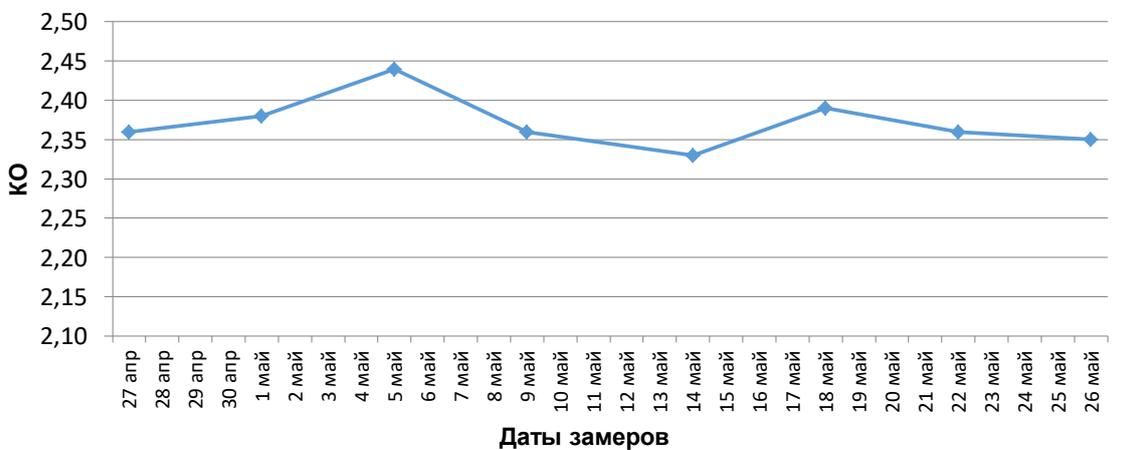
а



b



c



d

Рис. 7. Значения параметров электролизера № 1: а – уровень металла; б – уровень электролита; с – температура электролита; d – криолитовое отношение  
Fig. 7. Values of electrolyzer 1 parameters: a – metal level; b – electrolyte level; c – electrolyte temperature; d – cryolite ratio

быстро превышал предельное значение, что требовало увеличивать количество выливаемого алюминия за одну технологическую операцию. Такие резкие колебания значений основных параметров от установленных – типичный пример перехода от «холодного» хода электролизера к «горячему». Таким образом, в период исследований к ванне № 3 чаще всего приходилось применять действия корректирующего характера для приведения параметров к нормальным значениям. Для повышения КО использовалась добавка в электролит – сода кальцинированная. Для понижения температуры процесса и повышения уровня электролита в ванну загружали оборотный электролит. Количество выливок металла зависело от значений замеренного  $H_{Me}$ .

На электролизере № 4 в период исследований были отмечены высокие значения КО (2,40–2,50), уровня и температуры (970–980°C) электролита. Это типичный пример «горячего» хода ванны – технологического нарушения процесса электролиза [24].  $H_{Me}$  наблюдался стабильно низкий, что вынуждало снижать задание на выливку металла из ванны.

Корректировка электролита фтористым алюминием (для снижения КО) на ванне № 4 не производилась, т.к. необходимо было изучить влияние повышенного КО на температуру процесса и производительность электролизера. В процессе исследований для снижения повышенного  $H_{эл}$  расплав сливали из ванны, а для снижения повышенной температуры расплава до требуемых значений использовался оборотный электролит.

Работа электролизера № 5 была стабильной. КО имело значения в диапазоне 2,30–2,35, но они не выходили за пределы интервала варьирования. Соответственно, уровень и температура электролита были в пределах нормы. Стабильность хода электролизера не была нарушена;  $H_{Me}$  не опускался ниже отметки 17 см, и выливка производилась согласно установленному графику.

Из проведенного анализа полученных экспериментальных данных видно, что только два электролизера (№ 2 и № 5) в период исследований характеризовались стабильным технологическим ходом и производи-

тельностью, отсюда можно сделать вывод, что поддерживаемые на них значения основных параметров являются оптимальными.

Для стабилизации работы других ванн необходимо было проводить корректирующие действия: вводить фтористый алюминий или кальцинированную соду (для корректировки КО), осуществлять дополнительную выливку металла или, наоборот, не производить выливку, которая предусмотрена (согласно плану данного вида технологической операции) для корректировки  $H_{Me}$ .

По результатам проведенных исследований и данным суточной производительности каждого из исследуемых электролизеров были рассчитаны основные ТЭП работы ванн (табл. 5).

**Таблица 5.** Основные технико-экономические показатели работы исследуемых электролизеров  
**Table 5.** Main technical and economic performances of the studied electrolytic cells

№ электролизера	Суточная производительность, кг	Выход по току, %	Удельный расход технологической электроэнергии, кВт·ч/т
1	2383,0	94,4	12611
2	2516,3	99,7	11941
3	2314,3	91,7	12982
4	2248,3	89,1	13361
5	2449,7	97,1	12260

Из данных табл. 5 видно, что основные ТЭП электролизеров № 2 и № 5 выгодно отличаются от показателей работы остальных ванн. Отсюда можно сделать вывод, что состав и температура электролита были оптимальными на данных ваннах, которые обеспечили высокий  $\eta_T$  и низкий  $W_{э}$  (в ходе проведения исследований на данных электролизерах). Процесс электролиза на этих ваннах осуществлялся при следующих параметрах: КО = 2,21–2,35; температура электролита – 954–968°C; содержание  $CaF_2$  в электролите ~ 5%. Поскольку на данном типе электролизеров  $CaF_2$  образуется в электролите из оксида кальция, попадающего с процесс с сырьем (глиноземом), то в данном случае необходимо обращать внимание на качество поступающего на электролиз данного вида сырья

(с обязательным контролем в нем содержания CaO).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно проведенным исследованиям установлено, что при электролизе криолит-глиноземных расплавов на электролизерах с обожженными анодами ОА-300М на силу тока 313 кА можно достигнуть высоких значений выхода по току, наименьшего удельного

расхода технологической электроэнергии при КО, поддерживаемом в пределах 2,21–2,35, температуре электролита в интервале 954–968°C и содержании CaF<sub>2</sub> в расплаве ~ 5%.

Процесс электролиза на ваннах типа ОА-300М осуществляется без дополнительной корректировки состава электролита по содержанию CaF<sub>2</sub>, в связи с этим необходимо обращать внимание на качество поступающего на электролиз глинозема (с контролем содержания оксида кальция в нем).

### Библиографический список

1. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch B.J. Aluminum production in the times of climate change: The global challenge to reduce the carbon footprint and prevent carbon leakage // JOM. 2020. Vol. 72. Issue 1. P. 296–308. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03918-6>
2. Tarcy G.P., Torklep K. Current efficiency in prebake and soderberg cells // Essential readings in light metals. 2013. Vol. 2. P. 211–216. <https://doi.org/10.1002/9781118647851.ch30>
3. Prasad S. Studies on the Hall-Heroult aluminum electrowinning process // Journal of the Brazilian Chemical Society. 2000. Vol. 11. No. 3. P. 245–251. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532000000300008>
4. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
5. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the ecosoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter // Light metals. 2013. P. 573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>
6. 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>
7. 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>
8. Шепелев И.И., Головных Н.В., Сахачев А.Ю., Жижав А.М., Котлягин А.Г. Улучшение качества спека из гипсоангидритового техногенного сырья // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5. С. 225–239. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>
9. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC Rusal's smelters 2012-2014 // Light Metals. 2015. P. 757–762. <https://doi.org/10.1002/9781119093435.ch128>
10. Бажин В.Ю., Смольников А.Д., Петров П.А. Концепция энергоэффективного производства алюминия «Электролиз 600+» // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5. Ч. 3. С. 37–40. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.113>
11. Alamdari H. Aluminium Production Process: Challenges and Opportunities // Metals. 2017. Vol. 7. Issue 4. P. 133. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/7/4/133> (30.04.2020) <https://doi.org/10.3390/met7040133>
12. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. Электрометаллургия алюминия. Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.
13. Morishige T., Haarberg G.M., Gudbrandsen H., Skybakmoen E., Solheim A., Takenaka T. Effect of Composition and Temperature on Current Efficiency for Aluminium Electrolysis from Cryolite-Based Molten Alumina Electrolytes. [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/634e/47c6dd1fe4fc3e8698a4886a4cbd631de78d.pdf> (30.04.2020)
14. Сысоев И.А., Ершов В.А., Богданов Ю.В., Кондратьев В.В. Исследование влияния технологических факторов на температурные характеристики электролитов при производстве алюминия // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 2. С. 193–198.
15. Vlasov A.A., Feshchenko R.Y., Bazhin V.Y. Sizyakov V.M., Nevskaya M.A. Overheating of the cryolite-alumina melt caused by a change in its velocity // Russian metallurgy (Metally). 2016. No. 8. P. 718–721. <https://doi.org/10.1134/S0036029516080139>
16. Григорьев В.Г., Тепикин С.В., Кузаков А.А., Пьянкин А.П., Тимкина Е.В., Пинаев А.А. Автоматическая подача сырья в производстве алюминия // Вестник Горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. № 39. С. 97–104.
17. Cheung Cheuk-Yi, Menictas C., Bao Jie, Skyllas-Kazacos M., Welch B.J. Spatial thermal condition in aluminium reduction cells under influences of electrolyte flow // Chemical Engineering Research and Design. 2015. Vol. 100.

P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.04.034>

18. Grjotheim K., Welch B. Aluminium Smelter Technology. Dusseldorf: Aluminium Verlag, 1993. 260 p.

19. Skybakmoen E., Solheim A., Sterten Å. Alumina solubility in molten salt systems of interest for aluminum electrolysis and related phase diagram data // Metallurgical and Materials Transactions B. 1997. Vol. 28. P. 81–86.

<https://doi.org/10.1007/s11663-997-0129-9>

20. Li Jie, Yuan Chang-Fu, Tian Zhong-Liang, Wang Jia-Wei, Lal Yan-Qing, Liu Ye-Xiang. Alumina solubility in  $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-K}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3$  molten salt system prospective for aluminum electrolysis at lower temperature // Chemical Research in Chinese Universities. 2012. Vol. 28. Issue 1. P. 142–146.

21. Solheim A., Rolseth S., Skybakmoen E., Støen L., Sterten Å., Støre T. Liquidus Temperature and Alumina

Solubility in the System  $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3\text{-LiF-CaF}_2\text{-MgF}_2$  // Essential Readings in Light Metals. 2016. Vol. 2. P. 73–82.

[https://doi.org/10.1007/978-3-319-48156-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48156-2_10)

22. Васюнина Н.В., Васюнина И.П., Михалев Ю.Г., Виноградов А.М. Растворимость и скорость растворения глинозема в кислых криолитоглиноземных расплавах // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2009. № 4. С. 24–28.

23. Калужский Д.А. Влияние криолитового отношения электролита на работу мощных алюминиевых электролизеров // Записки Горного Института. 2004. Т. 159. Ч. 1. С. 151–153.

24. Ромасева Ю.А. Характеристика нарушений нормальной работы электролизера и способы их устранения // Инновационная наука. 2016. № 11-2. С. 65–67.

### References

1. Saevarsdottir G, Kvannd H, Welch BJ. Aluminum Production in the Times of Climate Change: The Global Challenge to Reduce the Carbon Footprint and Prevent Carbon Leakage. *JOM*. 2020;72(1):296–308. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03918-6>

2. Tarcy GP, Torklep K. Current Efficiency in Prebake and Søderberg Cells. *Essential Readings in Light Metals*. 2013;2:211–216.

<https://doi.org/10.1002/9781118647851.ch30>

3. Prasad S. Studies on the Hall-Heroult Aluminum Electrowinning Process. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2000;11(3):245–251.

<https://doi.org/10.1590/S0103-50532000000300008>

4. Sizyakov VM, Vlasov AA, Bazhin VYu. Strategy Tasks of the Russian Metallurgical Complex. *Tsvetnye Metally*. 2016;1:32–37. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>

5. Buzunov V, Mann V, Chichuk E, Frizorger V, Pinaev A, Nikitin E. The First Results of the Industrial Application of the EcoSoderberg Technology at the Krasnoyarsk Aluminium Smelter. *Light Metals*. 2013:573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>

6. Burdonov AE, Zelinskaya EV, Gavrilenko LV, Gavrilenko AA. Investigation of Substantial Composition of Alumina-Bearing Material of Aluminium Electrolysers for Usage in Primary Aluminium Technology. *Tsvetnye Metally*. 2018;3:32–38. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>

7. Dubovikov OA, Brichkin VN, Ris AD, Sundurov AV. 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>

8. Shepelev II, Golovnykh NV, Sakhachev AYU, Zhyzhaev AM, Kotlyagin AG. Improving Limestone-Nepheline Charge Sinter Quality by Gypsum Anhydrate Technogenic Raw Material Introduction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018;22(5):225–239. (In Russ.)

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>

9. Mann V, Buzunov V, Pitertsev N, Chesnyak V, Polyakov P. Reduction in Power Consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014. *Light Metals*. 2015:757–762. <https://doi.org/10.1002/9781119093435.ch128>

10. Bazhin VU, Smol'nikov AD, Petrov PA. Concept of Energy Efficiency Aluminum Production “Electrolysis 600+”. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* = International Research Journal. 2016;5(3):37–40. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.113>

11. Alamdari H. Aluminium Production Process: Challenges and Opportunities. *Metals*. 2017;7(4):133. Available from: <https://www.mdpi.com/2075-4701/7/4/133> [Accessed 30th April 2020].

<https://doi.org/10.3390/met7040133>

12. Mintsis MYa, Polyakov PV, Sirazutdinov GA. *Aluminum Electrometallurgy*. Novosibirsk: Nauka; 2001. 368 p.

13. Morishige T, Haarberg GM, Gudbrandsen H, Skybakmoen E, Solheim A, Takenaka T. Effect of Composition and Temperature on Current Efficiency for Aluminium Electrolysis from Cryolite-based Molten Alumina Electrolytes. Available from:

<https://pdfs.semanticscholar.org/634e/47c6dd1fe4fc3e8698a4886a4cbd631de78d.pdf> [Accessed 30th April 2020].

14. Sysoev IA, Ershov VA, Bogdanov YuV, Kondratiev VV. Investigation of Technological Factors Influence on the Electrolyte Temperature Characteristics in Aluminum Production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2010;2:193–198. (In Russ.)

15. Vlasov AA, Feshchenko RY, Bazhin VY, Sizyakov VM, Nevskaya MA. Overheating of the Cryolite–Alumina Melt caused by a Change in its Velocity. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016;8:718–721.

<https://doi.org/10.1134/S0036029516080139>

16. Grigoriev VG, Tepikin SV, Kuzakov AA, Pyankin AP, Timkina EV, Pinaev AA. Automatic Feed of Raw Materials in Aluminum Production. *Vestnik Gorno-metallurgicheskoy sekcii Rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2017;39:97–104. (In Russ.)

17. Cheung Cheuk-Yi, Menictas C, Bao Jie, Skyllas-



Kazacos M, Welch BJ. Spatial Thermal Condition in Aluminum Reduction Cells under Influences of Electrolyte Flow. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015;100:1–14.

<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.04.034>

18. Grjotheim K, Welch B. *Aluminium Smelter Technology*. Dusseldorf: Aluminium Verlag; 1993. 260 p.

19. Skybakmoen E, Solheim A, Sterten Å. Alumina Solubility in Molten Salt Systems of Interest for Aluminum Electrolysis and Related Phase Diagram Data. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1997;28:81–86. <https://doi.org/10.1007/s11663-997-0129-9>

20. Li Jie, Yuan Chang-Fu, Tian Zhong-Liang, Wang Jia-Wei, Lal Yan-Qing, Liu Ye-Xiang. Alumina Solubility in  $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-K}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3$  Molten Salt System Prospective for Aluminum Electrolysis at Lower Temperature. *Chemical Research in Chinese Universities*. 2012;28(1):142–146.

21. Solheim A, Rolseth S, Skybakmoen E, Støen L, Sterten Å, Støre T. Liquidus Temperature and Alumina Solubility in the System  $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3\text{-LiF-CaF}_2\text{-MgF}_2$ . *Essential Readings in Light Metals*. 2016;2:73–82. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48156-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48156-2_10)

22. Vasyunina NV, Vasyunina IP, Mikhalev YG, Vinogradov AM. The Solubility and Dissolution Rate of Alumina in Acidic Cryolite Aluminous Melts. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Universities' Proceedings. Nonferrous Metallurgy*. 2009;4:24–28.

23. Kaluzhskii DA. Effect of Electrolyte Cryolite Ratio on Powerful Electrolytic Cell Operation. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2004;159(1):151–153.

24. Romaseva YA. Characteristics of Electrolytic Cell Normal Operation Failures and Ways to Eliminate Them. *Innovacionnaya nauka*. 2016;11-2:65–67.

#### Критерии авторства

Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Володькина А.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Тютрин Андрей Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: an.tu@inbox.ru

**Немчинова Нина Владимировна**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующая кафедрой металлургии  
цветных металлов,  
Иркутский национальный  
исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: ninavn@yandex.ru

**Володькина Анна Александровна**,  
магистрант,  
Иркутский национальный  
исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: vo1odkinaa@yandex.ru

#### Authorship criteria

Tyutrin A.A., Nemchinova N.V., Volodkina A.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**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;  
e-mail: an.tu@inbox.ru

**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;  
✉ e-mail: ninavn@yandex.ru

**Anna A. Volodkina**,  
Master Degree Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: vo1odkinaa@yandex.ru