

УДК 669.71 : 614.84

**РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОХЛАЖДЕНИЮ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ
АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ**

**DEVELOPMENT OF MEASURES FOR COOLING EXHAUST GASES ALUMINUM
ELECTROLYZERS**

**Шахрай С.Г.¹, Немчинова Н.В.², Кондратьев В.В.², Мазуренко В.В.³,
Щеглов Е.Л.⁴,**

¹ - ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, ²- ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, ³- филиал ООО – РУС-Инжиниринг в г. Шелехов компании РУСАЛ, ⁴- филиал ООО – РУС-Инжиниринг в г. Красноярск компании РУСАЛ

Shahrai S.G., Nemchinova N.V., Kondratiev V.V., Mazurenko V.V., Shcheglov E.L.

Abstract

In the production of aluminum by the Söderberg technology, afterburning of combustible components of the anode gas (carbon monoxide, resinous) is carried out in the burner of the electrolyzer. In order to reduce the temperature of the combustion products, entering the gaswaste network of the electrolysis enclosure, the air in the burners is supplied with an excess of $\alpha = 6$. This value is significantly higher than the values recommended for the combustion of gaseous fuels. As a result, cooling of the burner by excessively sucked air, the combustion zone temperature may decrease to 300⁰C – level, insufficient for complete afterburning of combustible components of the anode gas, resulting in the removal of unburned resinous to flue network of unburned gaswaste, which are cooled, condensed and deposited on the walls of flues. Thus on the resinous adhere contained in the transportable anode gas dust particles of alumina, carbon, fluorides, reducing the cross sectional area of the flue.

Improving the efficiency of afterburning combustible components of the anode by optimizing excess air in the range $\alpha = 1.5 - 1.2$ provide the temperature in the combustion zone within 1270 – 1330⁰C. However, the temperature of the combustion gases coming out from the burner to the flue net increase to 1000⁰C and above, that carries the risk of irreversible

deformation of steel flue pipes and melting of baghouse filters gas-cleaning unit (GCU), the permissible operating temperature is in the range of 140 - 160⁰C.

In this paper, we proposed technical solutions to ensure safe operation of the flue gas networks and GCU of electrolysis buildings, while increasing the efficiency of afterburning resinous in the burner devices of electrolyzers.

Keywords

Aluminum, electrolyzer, baghouse filter, anode gases, afterburning, burner device, flue, deformation, cooling

При производстве алюминия по технологии самообжигающегося анода дожиг горючих компонентов анодного газа (оксида углерода, смолистых) осуществляют в горелочных устройствах электролизера. В целях снижения температуры продуктов горения, поступающих в газоходную сеть корпуса электролиза, воздух в горелочные устройства подается с избытком $\alpha = 6$. Эта величина существенно превышает значения, рекомендуемые для сжигания газообразного топлива. В результате охлаждения горелки избыточно подсасываемым воздухом, температура в зоне горения может снижаться до 300⁰C. При этом в систему газоотсоса выносятся несгоревшие смолистые, которые охлаждаются, конденсируются и совместно с пылевыми частицами, содержащимися в транспортируемых анодных газах, оседают на стенки газоходов, уменьшая их полезное сечение.

Повышение эффективности дожига горючих компонентов анодного путем оптимизации избытка воздуха в пределах $\alpha = 1,5 - 1,2$ обеспечит температуру в зоне горения в пределах 1270 – 1330⁰C. Однако при этом температура продуктов горения, поступающих из горелки в газоходную сеть, возрастет до 1000⁰C и выше, что несет риск необратимых деформаций стальных газоходов и плавления рукавных фильтров газоочистных установок (ГОУ), допустимая эксплуатационная температура которых находится в диапазоне 140 – 160⁰C.

В настоящей статье предложены технические решения, направленные на обеспечение безопасной эксплуатации газоходных сетей и ГОУ электролизных корпусов при повышении эффективности дожига смолистых в горелочных устройствах электролизеров.

Ключевые слова: алюминий, электролизер, рукавный фильтр, анодные газы, дожиг, горелочное устройство, газоход, деформация, охлаждение

Введение

Процесс электролиза криолитоглиноземного расплава, заключающийся в разложении оксида алюминия под действием постоянного электрического тока, сопровождается выделением на аноде газов: моно- и диоксида углерода [1]. При производстве каждой тонны алюминия в современных электролизерах с самообжигающимся анодом (СА) образуется от 40 до 45 м³ анодных газов, содержащих в среднем до 60 % об. СО₂ и до 40 % об. СО [2]. Кроме того, при коксовании СА выделяется до 19 кг/т Al смолистых веществ [1], основная часть которых совместно с анодными газами поступает в подколокольное пространство, и далее направляются в горелочные устройства, где монооксид углерода и смолистые вещества дожигаются до диоксида углерода. Эффективность дожига СО и смолистых веществ превышает 95 %, что обеспечивает существенное улучшение экологических показателей производства алюминия. Из горелочного устройства продукты горения по газоходным сетям транспортируются в ГОУ, где и происходит их окончательная очистка.

Одним из условий эффективной работы ГОУ, эксплуатирующей «сухую» технологию очистки газов глиноземом, является температура очищаемых газов, не выше 140 – 160⁰С, что исключает плавления рукавных фильтров. В целях снижения температуры продуктов горения, поступающих в газоходную сеть, горелочные устройства эксплуатируются с регламентным значением избытка воздуха (α) равным 6 [1]. Однако при данном значении α температура в зоне горения может снижаться до 300⁰С [3], что уменьшает эффективность дожига смолистых, и их концентрация в газах на выходе из горелки достигает 230 мг/м³ [4, 5]. По мере продвижения в газоходной сети смолистые охлаждаются, конденсируются и оседают на стенки газохода. При этом на них налипают пыль, представленная частицами глинозема, фтористых солей и углерода. При запыленности транспортируемого газа до 2 г/м³ [6] и регламентном объеме удаляемых от электролизера газов, равном 650 м³/ч (из которых около 50 м³/ч – собственно анодные газы, остальное – воздух, подсасываемый в горелку), от каждого электролизера в газоходную сеть уносится до 1300 г/ч пыли, что в масштабах корпуса электролиза, оборудованного 88 – 96 ваннами, составит 115 – 120 кг/ч, соответственно.

Образующиеся отложения существенно уменьшают полезное сечение газохода (рис. 1), увеличивают его аэродинамическое сопротивление и энергозатраты на транспортировку анодных газов, а также несут риск разрушения газоходной сети под тяжестью отложений.

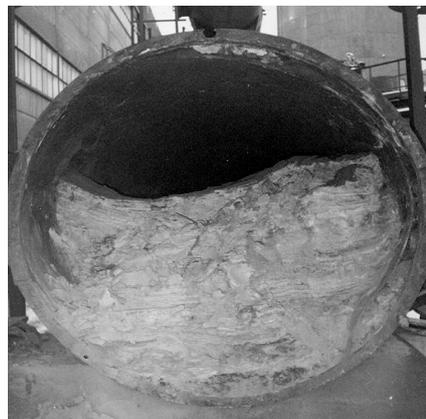


Рис. 1. Отложения пыли в межкорпусном газоходе

Поэтому поиск технических решений, направленных на повышение эффективности дожига смолистых веществ

в горелочных устройствах электролизера и снижение риска образования отложений в газоходных сетях корпусов электролиза приобретают особую актуальность.

Повысить эффективность дожига смолистых в горелочных устройствах электролизера возможно путем снижения избытка подсасываемого воздуха до $\alpha = 1,05 \div 1,2$. При этом в зоне горения будет обеспечена температура $1270 - 1330^{\circ}\text{C}$, достаточная для полного сгорания смолистых и входящих в их состав бенз(а)пирена [3]. Однако при этом возникают другие проблемы – возможность возгорания в газоходах смолистых, негоревших в горелочных устройствах, риск необратимой деформации от значительного перегрева газоходов вследствие высокой температуры отходящих газов на выходе из горелки (1000°C и более), и изготовленных, как правило, из конструкционной стали марки Ст 3, допустимая температура эксплуатации которой составляет всего $360 - 400^{\circ}\text{C}$ [7], а также риск плавления рукавных фильтров ГОУ.

Охлаждение анодных газов в кожухотрубном [8], ребристом [9] или пластинчатом теплообменниках [10], впрыском воды в газовый поток [11], используемые на алюминиевых заводах, расположенных в регионе Персидского залива с жарким климатом, в климатических условиях России мало приемлемы. Кроме этого, использование перечисленных способов требует дополнительного аппаратного оформления и обслуживания газоходных сетей.

В связи с этим для повышения эффективности дожига смолистых в горелочных устройствах и обеспечения безопасной эксплуатации газоходных сетей и элементов газоочистных установок электролизных корпусов авторами предложены следующие технические решения.

Технические решения по охлаждению анодных газов в газоходной сети

В общей сложности в ГОУ корпуса электролиза очищается от 60 до 70 тыс. м³/ч анодных газов. Этот объем представлен, преимущественно, воздухом, подсасываемым в горелочные устройства и избытком $\alpha = 6$. При оптимизации избытка воздуха в пределах $\alpha = 1,05 \div 1,2$ объем поступающих в ГОУ газов снизится до 10 – 12 тыс. м³/ч, однако при этом существенно возрастет их температура (до 400 – 500⁰С и выше), что приведет к выводу рукавных фильтров из строя [12].

Для охлаждения транспортируемых по газоходной сети анодных газов предлагается использование двух групп мероприятий – подсоса воздуха в газоходы и расположение на их наружных поверхностях теплоотводящих ребер, изготовленных из стали или алюминия.

Подсос воздуха, при сохранении общего объема газоотсоса от корпуса электролиза порядка 60 тыс. м³/ч, целесообразно осуществлять в двух точках газоходной сети – через воздухозаборные щели горелки и через патрубок, установленный на спуске горелки (спуск – участок газоходной сети, соединяющий горелку со сборным газоходом, рис. 2)

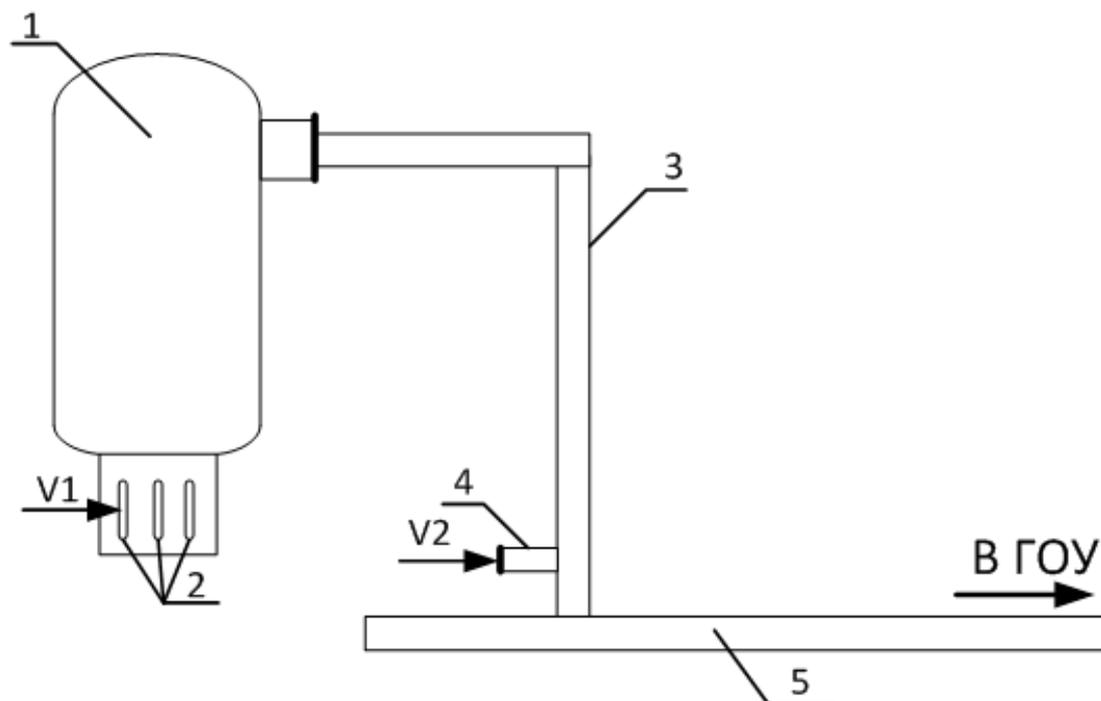


Рис. 2. Схема организации подсоса воздуха в газоходную сеть в условиях повышения эффективности работы горелок: 1 – горелка; 2 – воздухозаборные щели горелки; 3 – спуск от горелки; 4 – патрубок подсоса воздуха в спуск; 5 – сборный газоход корпуса электролиза; V_1 и V_2 - объем воздуха, подсасываемого через воздухозаборные щели и через патрубок в спуске, соответственно

Возможность реализации данного технического решения обосновывается тем, что подсос регламентного объема воздуха ($\alpha = 6$) снижает температуру в горелке до 300°C , когда горение поддерживается лишь за счет сгорания нафталина – основного компонента смолистых веществ, образующихся при коксовании анода [4]. При снижении объема подсасываемого воздуха до $\alpha = 1,05 \div 1,2$ (объем $V_1 = 95 - 120 \text{ м}^3/\text{ч}$) температура в зоне горения возрастет, в среднем, до 1300°C , а температура газов на выходе из горелочного устройства - до 1000°C и выше. Подсос через патрубок в спуске остального воздуха в объеме $V_2 = 480 - 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ снизит температуру газов в газоходе до $200 - 220^{\circ}\text{C}$, что следует из зависимости (1):

$$(G_{\Gamma} + G_{\text{B}})c_{\text{CM}}t_{\text{CM}} = G_{\Gamma}c_{\Gamma}t'_{\Gamma} + G_{\text{B}}c_{\text{B}}t'_{\text{B}} \quad , \quad (1)$$

где G_{Γ} и G_{B} - массовый расход охлаждаемых газов и вводимого воздуха, кг/с; c_{CM} , c_{Γ} и c_{B} - удельная массовая теплоемкость смеси газов и воздуха, Дж/кг К; t_{CM} – конечная температура охлаждения, соответствующая температуре смеси газов и воздуха, $^{\circ}\text{C}$; t'_{Γ} и t'_{B} - начальная температура газов и воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Дальнейшее охлаждение газов до $140 - 160^{\circ}\text{C}$, необходимое для безопасной эксплуатации рукавных фильтров ГОУ, происходит за счет теплового потока через стенку газохода теплопередачей, вычисляемого по формуле:

$$q_l^{\text{heat}} = kF(t_l - t_{\text{wal}}) \quad (2)$$

где q_l^{heat} - искомый тепловой поток; t_l - температура потока в ветви; t_{wal} – температура окружающей среды; k, F - коэффициент теплопередачи и площадь поверхности стенки ветви.

В то же время, согласно [13], наибольшая эффективность «сухой» очистки в ГОУ достигается при температуре очищаемых газов $120 - 140^{\circ}\text{C}$. Дополнительное охлаждение газов предлагается осуществлять за счет оснащения газоходной сети теплоотводящими ребрами высотой от 50 до 100 мм, размещенными по спирали на наружных поверхностях газоходов с шагом, превышающим диаметр последних в 2 – 5 раз (рис. 3). Такое расстояние, в соответствии с зависимостью (6), снизит угловой коэффициент взаимного облучения излучающей поверхности соседними поверхностями и увеличит интенсивность отвода тепла излучением. Теплоотводящие ребра увеличивают площадь теплоотдающей поверхности газоходной сети на 10 – 25 %. Размещение ребер по спирали обеспечивает частичное закручивание воздушных потоков, омывающих газоход, увеличивая отвод тепла в окружающую среду.

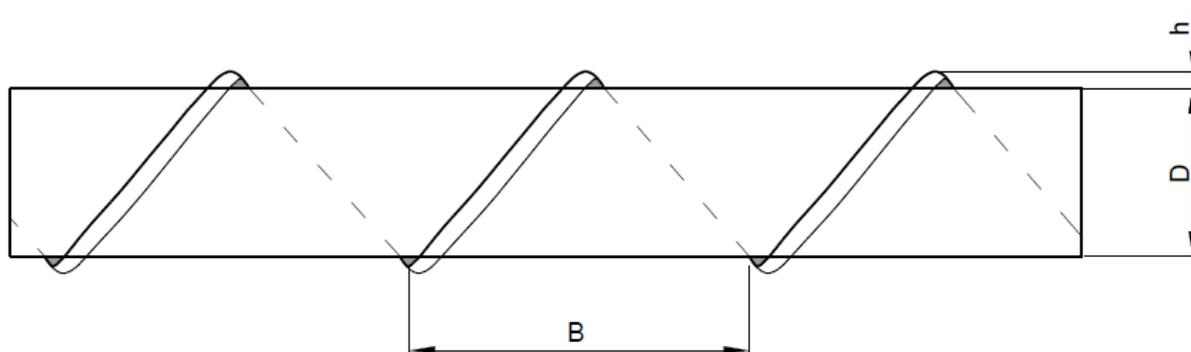


Рис. 3. Газоход, оснащенный теплоотводящими ребрами

Высота теплоотводящих ребер, от 50 до 100 мм, выбирается в зависимости от диаметра газохода, с соблюдением эргономических требований и требований безопасности. Газоходная сеть корпуса электролиза содержит газоходы широкого спектра диаметров – от 150 до 2000 мм и более. Соответственно, на газоходы большего диаметра целесообразно ставить теплоотводящие ребра высотой около 100 мм, что приведет к увеличению площади теплоотдачи на ~25 % и не создаст помех обслуживающему газоходную сеть технологическому персоналу. На газоходы меньшего диаметра, в которых наблюдается максимальная температура транспортируемых анодных газов, целесообразно ставить теплоотводящие ребра высотой от 50 мм, что увеличит площадь теплоотдающей поверхности газохода на 10 – 15 %, при соблюдении требований эргономики и безопасности при эксплуатации газоходной сети корпуса электролиза.

Оборудование газоходной сети теплоотводящими ребрами позволит дополнительно охладить транспортируемые анодные газы на 20 – 25⁰С за счет интенсификации теплообмена на границе «поток омывающего газоход воздуха – стенка газохода», а также увеличения отвода тепла от газохода за счет теплопроводности, конвекции и излучения и увеличения площади теплоотдающей поверхности и градиента температур горячей и холодной поверхностей, что следует из зависимостей (3 – 6) [14, 15]:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad , \quad (3)$$

$$Q_{m.n.} = \frac{F\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) \quad , \quad (4)$$

$$Q_k = \alpha S (t_{cm} - t_g) \quad , \quad (5)$$

$$Q_l = \varepsilon C_0 S \left[\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \varphi \quad , \quad (6)$$

где Nu - критерий теплоотдачи Нуссельта, характеризующий интенсивность теплообмена на границе поток – стенка; l - определяющий размер – диаметр трубы ($l = d$); $Q_{т.п.}$, Q_k , Q_l

– соответственно, тепловые потоки за счет теплопроводности, конвекции, лучеиспускания, Вт; q - удельный тепловой поток, Вт/м²; F - площадь изотермической теплоотдающей поверхности, м²; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; $\frac{dt}{dn} = gradt$ - градиент изменения температуры в направлении по нормали к изотермной поверхности; t_1 и t_2 - температура внутренней (горячей) и наружной (холодной) поверхностей стенок ГСК, °С; δ - толщина стенки, м; ε - степень черноты тела, доли ед.; $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; S - излучающая поверхность, м²; $T_{ст}$ - абсолютная температура излучающей стенки, °К; $T_в$ – абсолютная температура среды, в которую происходит излучение, °К; φ - угловой коэффициент взаимного облучения данной излучающей поверхности соседними поверхностями, доли ед.; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; $t_{ст}$ и $t_в$ - температура стенки и среды вне зоны процесса, °С

Таким образом, реализация предлагаемых технических решений обеспечит охлаждение транспортируемых по газоходной сети анодных газов до 120 -140⁰С и в 6 – 7 раз сократит их начальный физический объем согласно зависимости:

$$Q_{p.y.} = Q_{н.у.} \times \frac{760}{273} \times \frac{(273 + T_{г.})}{(B_{атм} \pm P_{ст})} \quad (7)$$

Где $Q_{p.y.}$ — объем газа при рабочих условиях (физический объем), м³; $Q_{н.у.}$ - объем газа при нормальных условиях – давлении 101 325 Па и температуре 0⁰С, м³, 101 325 - нормальное атмосферное давление, Па; $T_{г.}$ - °С, текущая температура электролизных газов в газоходе; $B_{атм}$ - текущее атмосферное давление в точке замер, Па; $P_{ст}$ - статическое давление (разрежение) в газоходе, Па.

Кроме этого, снизятся энергозатраты на транспортировку охлажденных газов, а также, в условиях снижения их физических объемов, сократятся габариты газоходных сетей, что ведет к уменьшению материалоемкости конструкции электролизера в целом.

Заключение

Основная причина образования отложений в газоходных сетях заключается в наличии в транспортируемых анодных газах пыли и смолистых веществ, несгоревших в горелочных устройствах электролизера. По мере движения газового потока, смолистые охлаждаются и конденсируются на стенках газоходов. При этом на них налипают пылеобразные частицы глинозема, фтористых солей и углерода.

Увеличение полноты дожига в горелочных устройствах смолистых за счет оптимизации объема воздуха, подсасываемого в зону горения в пределах $\alpha = 1,05 \div 1,2$, несет риск тепловой деформации газоходов продуктами горения, температура которых на входе в газоходную сеть будет достигать 1000°C и выше. Снизить температуру транспортируемых анодных газов предлагается за счет организации подсоса воздуха непосредственно в газоход и оборудования последнего теплоотводящими ребрами, стальными или алюминиевыми. Предлагаемые технические решения обеспечат температуру анодных газов на входе в ГОУ на уровне $120 - 140^{\circ}\text{C}$, снизит их физические объемы и энергозатраты на транспортировку охлажденных анодных газов, уменьшит материалоемкость газоходной сети корпуса электролиза.

Статья подготовлена с использованием результатов работ, выполненных в ходе проекта «Разработка сверхмощной, энергоэффективной технологии получения алюминия РА-550» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ № 218 (кооперация вузов и предприятий).

Библиографический список

1. Буркат, В.С. Сокращение выбросов в атмосферу при производстве алюминия / В.С. Буркат, В.А. Друкарев. С-Пб.: ООО «Любавич», 2005. - 275 с.
2. Шахрай С.Г. Совершенствование систем колокольного газоотсоса на мощных электролизерах Содерберга / С.Г. Шахрай, В.В. Коростовенко, И.И. Ребрик. – Красноярск: ИПК СФУ, 2010. – 146 с.
3. Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Белянин А.В. и [др.]. Расчет параметров дожига анодных газов алюминиевого электролизера: Сб. докл. VII межд. Конгресса «Цветные металлы и минералы 2015», Красноярск.: 2015. С. 146-147.
4. Куликов, Б. П. Переработка отходов алюминиевого производства / Б.П. Куликов, С.П. Истомин. – Красноярск : ООО «Классик Центр», 2004. – 480 с.
5. Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Кондратьев В.В. и [др.]. Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера // Цветные металлы. 2016. №2. С. 52-56.
6. Куликов, Б.П. Пылегазовые выбросы алюминиевых электролизеров с самообжигающимися анодами: монография / Б.П. Куликов, Ю.И. Сторожев. – Красноярск, изд-во СФУ, 2012. – 268 с.

-
7. Лашинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справ. / А.А. Лашинский, А.Р. Толчинский. – М.–Л.: Машгиз, 1963. – 468 с.
8. El Hani Bouhabila, Bernard Cloutier, Thierry Malard and [ets.]. Electrolytic cell gas cooling upstream of treatment center // *Light Metals*. 2012, P. 545-550.
9. El Hani Bouhabila, Erling Næss, Victoria Kielland Einejord and [ets.]. An innovative compact heat exchanger solution for aluminum off-gas cooling and heat recovery // *Light Metals*. 2013. P.793-797.
10. Peter Verbraak, Travis Turco, Peter Klut and [ets.]. Pot gas cooling technologies // *Light Metals*. 2014. P.635-639.
11. M. Bonnier, S. Massambi, J-M. Jolas and [ets.]. Development of a System Based on Water Atomization to Decrease, Prior to Treatment, the Temperature of the Gas Emitted from Aluminum Cells // *Light Metals*. The Minerals, Metals & Materials Society. 2007. P 193-197.
12. Шахрай С.Г., Сугак Е.В., Фризоргер В.К. и [др.]. Способы повышения эффективности термического обезвреживания анодных газов в горелочных устройствах электролизера: Сб. докл. XIII межд. конф. «Алюминий Сибири – 2007», Красноярск.: 2007. С. 405-409.
- 13 Hussain Ali Al Qassab, Sayed Salah Aqeel Ali Mohd, Geir Wedde, Anders Sørhuus. Hex ex retrofit enables smelter capacity expansion. «*Light Metals 2012*», p. 815-820.
14. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков, Л.: Химия, 1987. – 576 с.
- 15 Борисоглебский, Ю.В. Металлургия алюминия / Ю.В. Борисоглебский, Г.В. Галевский, Н.М. Кулагин и [др.]. – Новосибирск: Наука. Сибирская изд. фирма РАН, 1999. – 438 с.