



УДК 621.74.047

С.Г. Шахрай<sup>1</sup>, А.П. Скуратов<sup>1</sup>,  
А.В. Белянин<sup>2</sup>, В.В. Кондратьев<sup>3</sup>, А.С. Шахрай<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»  
<sup>2</sup>ОАО «РУСАЛ»  
<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
E-mail: shahrai5t6@mail.ru  
Дата поступления: 09.02.2017

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДОЖИГА АНОДНЫХ ГАЗОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

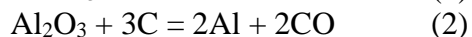
### Аннотация

Проанализирована проблема дожига анодных газов от алюминиевых электролизеров. Изучен механизм и основные закономерности образования и горения анодного газа. Получены новые данные по температуре, необходимой для сжигания бенз(а)пирена, наиболее опасного компонента анодных газов. Предложен ряд технических решений по повышению эксплуатационных характеристик горелочных устройств алюминиевых электролизеров.

**Ключевые слова:** алюминиевый электролизер, горелочное устройство, дожиг, эффективность, эксплуатационные характеристики, конструкция.

### Образование и дожиг анодных газов алюминиевого производства

В электролизерах с самообжигающимся анодом силой тока 170 – 175 кА, в результате реакций (1; 2) восстановления алюминия из глинозема:



и реакции (3) восстановления диоксида углерода углеродом (реакции Будуара):



образуется от 42 до 45  $\text{нм}^3/\text{ч}$  анодных газов, содержащих до 40 % об. СО и до 60 %  $\text{CO}_2$  [1]. Помимо анодного газа, при коксовании самообжигающегося анода выделяется до 20 кг/тАI смолистых веществ, основная часть которых, до 17 кг/тАI, поступает в подколольное пространство электролизера [2], откуда они совместно с анодными газами, направляются на дожиг.


Преимущественно дожиг осуществляется в двух щелевых горелочных устройствах, диагонально размещенных на угловых секциях газосборного колокола электролизера [3], при избытке воздуха  $\alpha$ , подаваемого в зону горения, близким шести. При таком значении  $\alpha$  температура в зоне горения, вследствие охлаждения горелки избыточным воздухом, как правило, не пре-

вышает  $900^\circ\text{C}$ , а время нахождения сжигаемых компонентов в зоне высоких температур составляет 0,5 – 0,6 с. При этих параметрах эффективность дожига горючих компонентов составляет 88 – 90 %, что недостаточно для достижения норм выбросов, установленных Российским и международным экологическим законодательством.

Эффективность дожига определяется временем нахождения сжигаемых компонентов в зоне высоких температур, объемом и температурой воздуха, подаваемого в зону горения, интенсивностью смешивания топлива с окислителем. В соответствии с [4], время нахождения анодных газов в зоне высоких температур должно составлять от 1,0 до 1,5 с. Температура в зоне горения должна быть достаточной для сжигания наиболее опасного компонента смолистых веществ – бенз(а)пирена. Его температурные пределы воспламенения могут быть определены по формулам:

$$t_H = -62,5 + 0,655t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j l_j \quad (4)$$

$$t_B = -41,4 + 0,723t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j l_j \quad (5)$$

где:  $t_{\text{кип}}$  - температура кипения,  $^\circ\text{C}$ ;  $l_j$  - число связей и структурных групп вида  $a_j$  в молекуле. Для  значение  $a_j$  для  $t_H = -4,4$ , для  $t_B = -4,4$

Расчет по представленным зависимостям показывает, что для бенз(а)пирена, температура кипения которого составляет  $495^{\circ}\text{C}$ , а молекула состоит из пяти групп и имеет 46 связей, температурные пределы воспламенения находится в диапазоне от  $1270$  до  $1330^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, расчетная температура воспламенения бенз(а)пирена на 5 - 10 % превышает данные, полученные ранее другими исследователями, и изложенные в работе [5].

Калориметрическая температура горения анодного газа, учитывающая теплоемкость продуктов сгорания, объем и теплоемкость воздуха, поступающего в зону горения, может быть определена по зависимости:

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_n^p + c_T t_T + V_B c_B t_B}{V_{\Sigma 0} c_{\text{пр}} + V_B^{\text{изб}} + C_B^{\text{изб}}} \quad (6)$$

где:  $Q_n^p$  - низшая теплота сгорания анодных газов,  $\text{кДж/м}^3$ ;  $c_T$  - средняя теплоемкость сжигаемого анодного газа в диапазоне температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $t_T$ ,  $\text{кДж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $c_B$ ,  $c_{\text{изб}}$  и  $C_B^{\text{изб}}$  - соответственно, теплоемкость воздуха, поступающего в зону горения, неразбавленных продуктов сгорания и избыточного воздуха в диапазоне температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $t_{\text{кал}}$ ,  $\text{кДж/м}^3$ ;  $t_T$  и  $t_B$  - соответственно, температура анодного газа и воздуха на входе в горелку,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $V_B$  - объем воздуха, поступающего для сжигания  $1 \text{ м}^3$  анодного газа,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\Sigma 0}$  - суммарный объем неразбавленного воздухом продуктов сгорания горючих компонентов  $1 \text{ м}^3$  анодного газа,  $\text{м}^3$ ;  $V_B^{\text{изб}}$  - объем избыточного воздуха, содержащегося в продуктах сгорания,  $\text{м}^3$ , а действительная усредненная температура в зоне горения, с учетом пирометрического коэффициента, по зависимости:

$$t_{\text{д}} = t_{\text{кал}} \eta \quad (7)$$

где:  $\eta$  - пирометрический коэффициент, для щелевых горелок примем 0,85

Зависимость температуры в зоне горения от объема воздуха (избытка  $\alpha$ ) и его температуры, рассчитанные по зависимостям 3;4 показана на диаграмме (рисунок 1).

В соответствии с рис. 1, температура в зоне горения в пределах  $1270 - 1330^{\circ}\text{C}$  обеспечивается при соблюдении следующих условий: в зимнее время года, когда температура воздуха, подаваемого в зону

горения может достигать  $-30^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка должен находиться в диапазоне  $\alpha = 1,05 \div 1,15$ ; в летнее время года, когда температура воздуха, подаваемого в зону горения может достигать  $+30^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка должен находиться в диапазоне  $\alpha = 1,2 \div 1,25$  [6]. При этом, за счет снижения  $\alpha$  до оптимальных значений, время нахождения сжигаемых компонентов в зоне высоких температур возрастает до  $1,0 - 1,5 \text{ с}$ .

Таким образом, проблемы повышения температуры и времени нахождения сжигаемых компонентов в зоне горения, необходимые для их полного дожига, решаются технологическими мероприятиями. Однако, при этом остаются нерешенными проблемы повышения интенсивности смешивания сжигаемых газов с воздухом, подаваемым в зону горения, а также стабилизации температуры последнего, независимо от внешних климатических условий. Решить эти проблемы предлагается за счет конструктивных изменений горелочных устройств и утилизации теплоты, излучаемой поверхностями газоотводящих патрубков, соединяющих горелочные устройства с газоходной сетью корпуса электролизера.

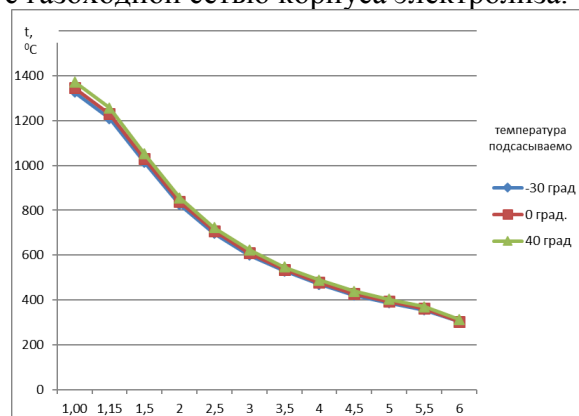


Рисунок 1. Зависимость действительной температуры в зоне горения от избытка  $\alpha$  и температуры подаваемого воздуха

### Конструктивные изменения горелочных устройств алюминиевого электролизера

Повысить эффективность дожига анодных газов возможно за счет модернизации горелочных устройств, обеспечивающей повышение интенсивности смешивания сжигаемых анодных газов с воздухом, улучшения условий движения потока в го-

релке, выравнивания разрежений в горелочных устройствах корпуса электролиза, подачи в зону горения предварительно подогретого воздуха, сокращения интенсивности образования отложений в горелке, увеличения длительности пребывания сжигаемых газов в зоне высоких температур. Согласно [7, 8], эти положения необходимо максимально выполнять при разработке горелочных устройств.

Для регулирования объема воздуха, подаваемого в зону горения, и интенсификации смешивания сжигаемых компонентов с воздухом предлагается горелочное устройство, оборудованное закрепленными на поворотных осях дисковыми турбулизаторами (рисунок 2) [9].

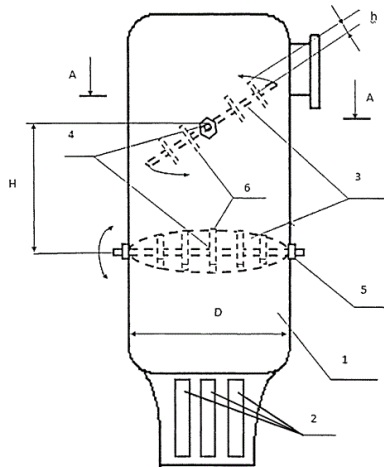


Рисунок 2. Горелочное устройство алюминиевого электролизера: 1 – горелка; 2 – воздухозаборные щели; 3 – дисковые турбулизаторы; 4 – поворотные оси; 5 – гайки, фиксирующие положение диска; 6 – выступы на диске

Диски с обеих сторон имеют выступы и расположены на разных уровнях по высоте горелки не менее чем в два яруса, с возможностью их поворота на угол 360 градусов. При прохождении газового потока через выступы происходит его срыв и образование локальных вихрей, повышающих интенсивность смешивания сжигаемой газовой смеси. Повышение интенсивности смешивания происходит и за счет периодического отклонения потока от продольной оси горелки при его обтекании дисковых турбулизаторов, закрепленных на поворотных осях, угол между проекциями которых на горизонтальную плоскость составляет от 0 до 90 град.

При эксплуатации горелки в режиме сжигания анодных газов диски поворотом оси устанавливают таким образом, чтобы разрежение в зоне горения находилось в пределах 15-20 Па, что обеспечивает подсос воздуха в пределах оптимального  $\alpha = 1,05 \div 1,25$ . Оси в определенном положении фиксируются с помощью крепежных гаек. При необходимости, отключение горелки от системы газотосоа осуществляют полным перекрытием ее поперечного сечения установкой дисков в горизонтальное положение. Очистку дисков от пылевых отложений осуществляют поворотом осей на  $180^{\circ}$ , что обеспечивает удаление отложений за счет силы тяжести.

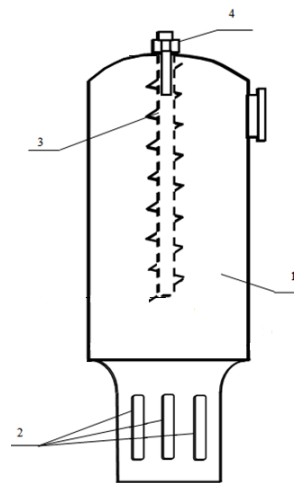


Рисунок 3. Горелочное устройство со статическим завихрителем  
1 – горелка, 2 – воздухозаборные щели; 3 – завихритель; 4 – крепежная гайка

Повысить интенсивность смешивания сжигаемых компонентов с воздухом возможно за счет целенаправленного закручивания газового потока в зоне горения с помощью статического (рисунок 3) [10, 11] или вращающегося (рисунок 4) [12] завихрителей.

Статичный завихритель, закрепленный в полости горелочного устройства, обеспечивает равномерное распределение потока воспламененной газовой смеси в объеме топочного пространства, а также играет роль теплового аккумулятора, предохраняющего горелку от охлаждения атмосферным воздухом, омывающим горелку снаружи. Вращающийся завихритель закреплен на подшипниковом валу, с возможностью вращения под действием сил, создаваемых движущимся газовойсмесью.

потоком. Завихритель выполнен в виде пропеллера и расположен в посадочном патрубке горелочного устройства на уровне верхней кромки воздухозаборных щелей. Пропеллер обеспечивает целенаправленное закручивание сжигаемого газового потока в горелочном устройстве, что сопровождается увеличением интенсивности смешивания и дожига горючих компонентов анодного газа.

Диаметр завихрителя, равный  $0,8 \pm 0,9$  диаметра посадочного патрубка, обеспечивает практически полный контакт и перемешивание сжигаемых анодных газов, поступающих в горелочное устройство снизу посадочного патрубка, и воздуха, поступающего через воздухозаборные щели. Размещение завихрителя на уровне верхней кромки воздухозаборных щелей обеспечивает предварительное смешивание сжигаемых анодных газов и воздуха до их входа в камеру сгорания, с соответствующим увеличением эффективности дожига горючих компонентов.

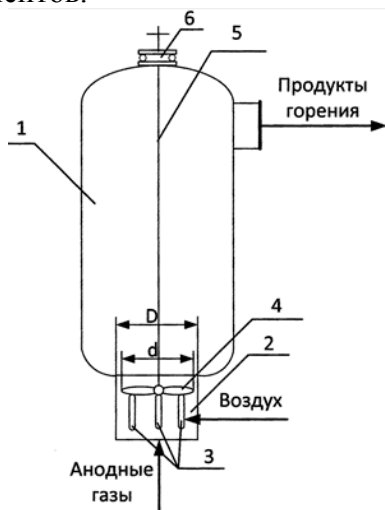


Рисунок 4. Горелочное устройство с вращающимся завихрителем: 1 - камера сгорания; 2 - посадочный патрубок; 3 - воздухозаборные щели; 4 - завихритель; 5 - вал; 6 - подшипник

Ввод в горелку сжигаемых анодных газов осуществляется снизу, через патрубок, выполненный в виде прямоугольного колена. При подаче воздуха через воздухозаборные щели равной площади происходит отклонение ядра пламени от продольной оси горелки, что вызывает преждевре-

менное прогорание ее стенок. Эпюра скоростей потока в горелке, при подсосе в нее воздуха через воздухозаборные щели равной площади, показана на рисунке 5. Обеспечить симметричное распределение пламени в зоне горения предлагается разновеликими объемами воздуха, подсасываемыми через воздухозаборные щели переменной площади (рисунок 6) [13, 14]. При этом меньший объем воздуха подсасывается в зону высоких скоростей, расположенную вблизи внешней стенки прямоугольного патрубка, больший – в зону низких скоростей, расположенную вблизи внутренней стенки патрубка.

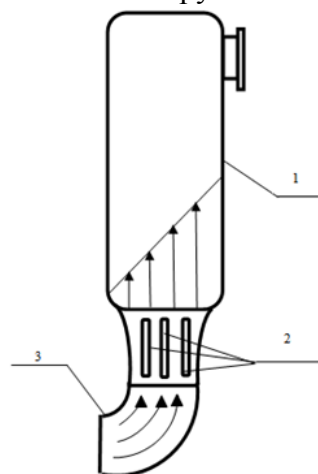


Рисунок 5. Эпюра скоростей потока в горелке с воздухозаборными щелями равной площади: 1 - зона горения; 2 - воздухозаборные щели; 3 - патрубок подвода анодных газов

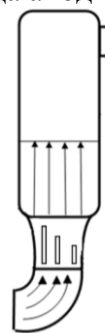


Рисунок 6. Эпюра скоростей потока в горелке с воздухозаборными щелями переменной площади

Общий недостаток эксплуатируемых горелочных устройств заключается в более чем 1,5-кратном различии диаметров патрубка подвода анодных газов и зоны горения. На входе потока в зону горения происходит его внезапное расширение, в результате чего образуется струя, отделенная от

остальной среды поверхностью раздела, которая распадается и свертывается в мощные вихри. Таким образом, при регламентном объеме газоотсоса от электролизера  $652 \text{ м}^3/\text{ч}$  (через горелку –  $326 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и средней температуре в зоне горения  $900^\circ\text{C}$  каждая горелка создает аэродинамическое сопротивление величиной  $8,3 \text{ Па}$ , из которых  $8 \text{ Па}$  приходится на местное сопротивление, обусловленное наличием участка внезапного расширения потока, и  $0,3 \text{ Па}$  – на сопротивление трения потока о стенки камеры сгорания [15].

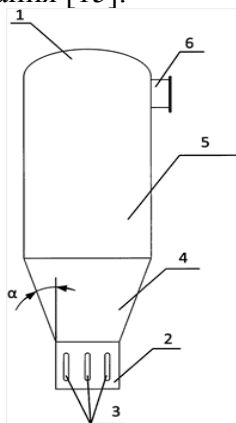


Рисунок 7. Устройство для дожигания анодных газов алюминиевого электролизера: 1 – горелка; 2 - посадочный патрубок; 3 – воздухозаборные щели; 4 - диффузор; 5 - зона горения; 6 – патрубок отвода продуктов горения в систему организованного газоотсоса

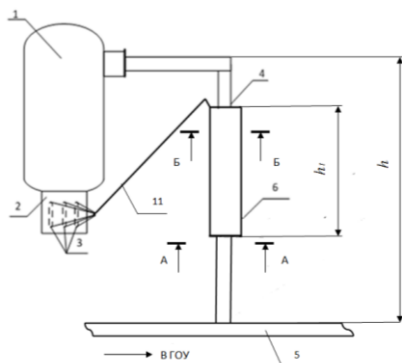


Рисунок 8. Устройство для дожигания анодных газов алюминиевого электролизера: 1 – горелка; 2 - посадочный патрубок; 3 - воздухозаборные щели; 4 – патрубок отвода продуктов горения; 5 – газоходная сеть корпуса электролизера; 6 – теплообменник

Для снижения сопротивления горелочного устройства предложена конструкция, в которой патрубок подвода анодных газов соединен с зоной горения коническим диффузором с углом расширения  $\alpha=10\div15^\circ$ , а отношение их площадей поперечного сечения составляет  $2,5\div3,5$  (рисунок 7) [16]. Анодные газы, после смешивания в патрубке с воздухом, воспламеняются и поступают в диффузор. Здесь газовоздушная смесь движется без отрыва от стенок и происходит плавное расширение потока, компенсирующее увеличение давления, возникающего вследствие теплового расширения сжигаемых газов. Окончательный дожиг анодных газов происходит в зоне горения, размещенной в цилиндрической части горелки, откуда продукты горения удаляются в систему организованного газоотсоса. Технический результат заключается в снижении сопротивления горелочного устройства в среднем на  $8 \text{ Па}$ .

Повысить эффективность работы горелочного устройства предлагается также за счет подачи в зону горения воздуха, предварительно подогретого теплотой, рассеиваемой в окружающую среду поверхностями патрубка, соединяющего горелку с газоходной сетью корпуса электролизера (рисунок 8) [17].

Для утилизации этой теплоты на патрубке устанавливается теплообменник. Зазор между теплообменником и газоходом составляет  $30 \div 100 \text{ мм}$ . Нижняя торцевая часть теплообменника снабжена отверстиями для подачи воздуха в зону нагрева, а верхняя торцевая часть – отверстием, через которое подогретый воздух отводится к воздухозаборным щелям горелки. Целесообразность расположения теплообменника на патрубке обосновывается тем, что он расположен в непосредственной близости от горелки и здесь наблюдаются максимальные температуры его поверхности,  $400^\circ\text{C}$  и выше, достаточные для нагрева воздуха до  $200 - 300^\circ\text{C}$ .

Размещение отверстий подсоса холодного воздуха на нижней, а отвода нагретого воздуха на верхней стенке теплообменника, за счет конвекции, улучшает

условия его движения к воздухозаборным щелям горелки.

Однако, увеличение температуры в зоне горения до  $1270 - 1330^{\circ}\text{C}$  за счет оптимизации избытка воздуха и интенсификации его смешивания с горючими компонентами несет риск термической деформации газоходов и возникновения в них пожаров.

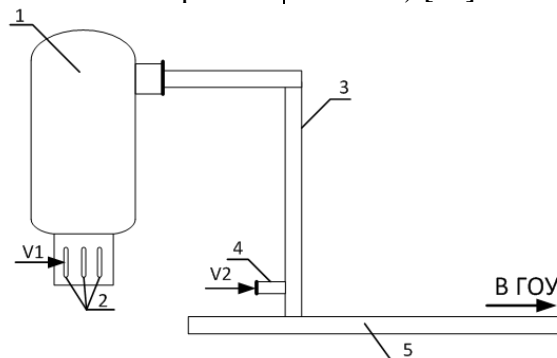


Рисунок 9. Способ удаления анодных газов от алюминиевого электролизера:

1 - горелочное устройство; 2 – воздухозаборные щели горелки; 3 – патрубок, соединяющий горелку с газоходной сетью; 4 – лючок для подсоса воздуха; 5 – газоходная сеть

В соответствии с предлагаемым техническим решением, через воздухозаборные щели подается  $120 \div 150 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха, что обеспечивает температуру в зоне горения на уровне  $1200 \div 1300^{\circ}\text{C}$  и время нахождения сжигаемых компонентов в зоне высоких температур в течение  $1 \div 1,5 \text{ с}$ , достаточных для полного дожига горючих компонентов анодного газа. Объем воздуха, подаваемого в патрубок, в 4 – 4,5 раза и составляет  $500 \div 550 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что обеспечивает охлаждение продуктов горения до  $150 \div 200^{\circ}\text{C}$  и исключает риски тепловой деформации газоходов и возникновения пожаров как в газоходной сети, так и в газоочистных установках, где анодные газы подвергаются окончательной очистке.

### Заключение

Разработанные конструкции горелочных устройств, представленные в настоящей статье, позволяют существенно повысить эффективность дожига анодных газов алюминиевого производства, до 98 % и более. Они легко вписываются в существующие системы газоудаления, а экономические затраты, связанные с изменениями конструкций, окупаются за счет снижения экологических платежей за выбросы оксида углерода и смолистых веществ, включая чрезвычайно опасный бенз(а)пирен.

Для снижения температуры продуктов горения, транспортируемых по газоходной сети корпуса электролизера, предлагается организовать подсос воздуха в двух точках – через воздухозаборные щели горелки и через патрубок, соединяющий горелку с продольным подкорпусным газоходом (рисунок 9) [18].

### Библиографический список

1. Шахрай, С.Г. Совершенствование систем колокольного газоотсоса на мощных электролизерах Содерберга: монография / С.Г. Шахрай, В.В. Коростовенко, И.И. Ребрик. – Красноярск.: ИПК СФУ. – 2010. – 146 с.
2. Буркат, В.С. Сокращение выбросов в атмосферу при производстве алюминия / В.С. Буркат, В.А. Друкарев. С-Пб.: ООО «Любавич», 2005 - 275 с.
3. Басов, А.И. Справочник механика заводов цветной металлургии А.И. Басов, Ф.П. Ельцев. – М.: Металлургия, 1981. – 495 с.
4. Стаскевич, Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.
5. Климова Л.Л., Павлюченко Г.А., Белов Б.А. Сравнительная оценка различных горелочных устройств для алюминиевых электролизеров. // Цветная металлургия. - 1979. - № 19. - С. 54 – 56.
6. 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-2015, Красноярск, 14-18 сент. 2015, С. 146-147.

7. Зиганшин, М.Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин. – М.: Экопресс-ЗМ, 1988. – 505 с.
8. Гушин, С.Н. Расчеты горения топлив: учебное пособие [Текст] / С.Н. Гушин, М.Д. Казяев. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 1995. – 48 с.
9. Пат. 2534712 РФ, МПК С25С3/22. Устройство для дожигания анодных газов алюминиевого электролизера / Шахрай С.Г., Бажин В.Ю., Кондратьев В.В. и [др.]; опубл. 10.12.2014, Бюл. №34.
10. Пат. 2456380 РФ, МПК С25С3/06. Горелочное устройство алюминиевого электролизера с интенсивным смешиванием компонентов / Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Баранов А.Н. и [др.]; опубл. 20.07.2012, Бюл. №20.
11. Евразийский патент №020634. Горелочное устройство алюминиевого электролизера с интенсивным смешиванием компонентов / Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Баранов А.Н. и [др.]. Опубл. 30.12.2014.
12. Пат. 164940 РФ, МПК С25С3/22. Горелочное устройство алюминиевого электролизера с интенсивным смешиванием компонентов / Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Белянин А.В. и [др.]; опубл. 27.09.2016, Бюл. №27.
13. Пат. 2456383 РФ, МПК С25С3/22. Горелочное устройство щелевого типа алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом / Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Баранов А.Н. [и др.]; опубл. 20.07.2012, Бюл. №20.
14. Евразийский патент №021704. Горелочное устройство щелевого типа алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом / Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Баранов А.Н. [и др.]. Опубл. 31.08.2015.
15. Шахрай С.Г., Белянин А.В., Русанов Н.В. и [др.]. Повышение энергоэффективности производства алюминия путем дизайнерских изменений горелочного устройства электролизера / Сб. материалов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный-2016», Красноярск, СФУ, 15-25 апреля 2016. – с. 15-18 (сборник «Переработка минерального сырья, содержащего цветные металлы»).
16. Пат. 163339 РФ, МПК С25С3/00. Устройство для дожигания анодных газов алюминиевого электролизера / Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Белянин А.В. и [др.]; опубл.: 10.07.2016, Бюл. №19.
17. Заявка №2016145894 РФ. Устройство для дожигания анодных газов алюминиевого электролизера / Шахрай С.Г., Белянин А.В., Скуратов А.П. и [др.]; заявл. 22.11.2016.
18. Заявка 2016106464 РФ. Способ удаления анодных газов от алюминиевого электролизера / Шахрай С.Г., Щеглов Е.Л., Мазуренко В.В. и [др.]; заявл. 24.02.2016.

---

*Information about the paper in English*

**S.G. Shakhrai<sup>1</sup>, A.P. Skuratov<sup>1</sup>,  
 A.B. Belyanin<sup>2</sup>, V.V. Kondratiev<sup>3</sup>, A.S. Shakhrai<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>Siberian Federal University,  
<sup>2</sup>RUSAL,  
<sup>3</sup>Irkutsk National Research Technical University  
 E-mail: shahrai5t6@mail.ru  
 Received 09.02.2017

**IMPROVING THE PERFORMANCE OF AFTERBURNERS USED IN ALUMINIUM ELECTROLYZERS**

**Abstract**

The article looks at the problem of anode gas afterburning in aluminium electrolyzers. The authors looked at the mechanism of anode gas evolution and afterburning and identified the key patterns. New data were obtained on the temperature required to burn benzopyrene, the most hazardous component of anode gases. The authors offered a number of solutions for improving the performance of the afterburners used in aluminium electrolyzers.

**Keywords:** aluminium electrolyzer, burner arrangement, afterburning, efficiency, performance, design.

---