

**КОМПЛЕКСНЫЙ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ
ГАЗОУДАЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА С САМООБЖИГАЮЩИМСЯ АНОДОМ**

Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Дектерев А.А., Шарыпов Н.А.

¹ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет; ²ОАО РУСАЛ Красноярск

Система газоудаления электролизера с самообжигающимся анодом включает в себя три основных элемента: газосборный колокол (ГСК) для сбора анодных газов, образующихся в процессе электролитического получения алюминия; горелку для дожигания горючих компонентов анодного газа; газоходную сеть, по которой термически обезвреженные анодные газы транспортируются на окончательную очистку в газоочистные установки. Конструкция ГСК представляет собой чугунные секции, навешиваемые по периметру анодного кожуха электролизера, которые совместно с боковой поверхностью анода и поверхностью расплава образуют газоходный канал. Размещение газосборника непосредственно над электролитом и вблизи анода, т.е. у места выделения загрязняющих веществ, позволяет минимизировать объем газов, удаляемых от электролизера, до 600...800 м³/ч. При этом объем анодных газов, образующихся в процессе окисления анода, на современных электролизерах с самообжигающимся анодом составляет ~ 45 м³/ч.

Дожиг оксида углерода и полициклических ароматических углеводородов, выделяющихся в процессе коксования самообжигающегося анода, осуществляют в горелках, представляющих собой цилиндрическую камеру, в нижней части оборудованную патрубком подвода анодных газов, снабженным воздухозаборными щелями. Разница объемов образующегося анодного газа и объема газов, удаляемых от электролизера показывает, что через воздухозаборные щели воздух в горелку подсасывается с избытком $\alpha \geq 6$, что негативно отражается на устойчивости горения.

Протяженность газоходной сети корпуса электролиза порядка 2...2,5 км, она содержит значительное количество тройников и участков внезапного расширения потока суммарным гидравлическим сопротивлением более 2000 Па, на преодоление которого затрачивается до 30 % мощности, развиваемой дымососами.

В работе представлены результаты аэродинамического расчета ГСК и газоходной сети, и теплотехнического - горелочных устройств, позволяющие дать комплексную оценку влияния их геометрических и режимных параметров на эффективность и

эксплуатационную надежность работы системы газоудаления электролизера с самообжигающимся анодом в условиях увеличения силы тока.

Ключевые слова: алюминиевый электролизер, самообжигающийся анод, газоотсос, система, газосборный колокол, горелка, газоходная сеть, расчет, прогноз, параметры

The gas removal system of a reduction cell with a Soderberg anode includes three main elements: a skirt for collecting the anode gases formed during electrolytic production of aluminum; burner for afterburning of the combustible components of the anode gas; a gas flow network through which thermally neutralized anode gases are transported for final purification to gas treatment plants. The design of skirt is a cast-iron section hung around the perimeter of the anode casing, which together with the side surface of the anode and the surface of the melt form a gas channel. Placement the gas collector directly above the electrolyte and near the anode, i.e. At the point of emission of pollutants, allows to minimize the volume of gases removed from the cell to 600 ... 800 m³/h. At the same time, the volume of anode gases formed during oxidation of the anode on modern aluminum reduction cells with Soderberg anode is ~ 45 m³/h.

Burning carbon monoxide and polycyclic aromatic hydrocarbons that are released during the coking process of a Soderberg anode are carried out in the burners, which are a cylindrical chamber, in the lower part equipped with an anode gas supply pipe equipped with air intake slots. The difference in the volume of the resulting anode gas and the volume of gases removed from the cells shows that air is sucked into the burner through the air intake slots with an excess of $\alpha \geq 6$, which negatively affects the stability of combustion.

The length of the gas supply network of the body of electrolysis is of the order of 2 ... 2.5 km, it contains a significant number of tees and sections of sudden expansion of the flow with a total hydraulic resistance of more than 2000 Pa, which is consumed up to 30% of the power generated by the exhaust fans.

The paper presents the results of the aerodynamic calculation of the skirt and the gas flow network and the heat engineering calculation - afterburners. These calculations make it possible to give a comprehensive assessment of the effect of their geometric and operating mode parameters on the efficiency and operational reliability of the gas removal system of a cell with a Soderberg anode under conditions of increasing current.

Keywords: aluminum reduction cell, Soderberg anode, fume exhaust fan, system, skirt, afterburner, gas flow network, calculation, prediction, parameters

Газосборный колокол и горелочное устройство

На современных электролизерах с самообжигающимся анодом силой тока 170...175 кА образуется порядка 45 м³/ч анодных газов, которые представляют собой многокомпонентную газодисперсную смесь, содержащую более 40 % об. горючих компонентов – оксида углерода, метана, водорода, смолистых веществ (включая бенз(а)пирен) и до 60 % об. балластной примеси – диоксида углерода. Количественный и качественный состав образующихся анодных газов (табл. 1) [1], зависит от герметичности ГСК, а также количества кислорода, поступающего в подколокольное пространство и расхода анода [2; 3]. Для определения количества СО в образующихся анодных газах ($K_{CO}^{обр.}$), кг/т Al, используется соотношение:

$$K_{CO}^{обр.} = 4,67 D_c^0 P_{ам} - 1,75 P_o \quad (1)$$

где D_c^0 – доля углерода, подвергшегося первичному окислению; $P_{ам}$ – удельный расход анодной массы, кг/т Al; P_o – удельный расход кислорода, окисляющего углерод под колоколом, кг/т Al:

$$P_o = 930 + 0,54 \left(\frac{\eta_{аз}^{эк}}{\eta_{аз}} \right) P_{ам} \times D_c^0 \quad (2)$$

где $\eta_{аз}$ – коэффициент эффективности сбора анодных газов ГСК, доли ед.

Таблица 1

Количественный и качественный состав образующихся анодных газов при различных значениях эффективности ГСК [1]

	Объем первично образующихся газов, м ³ /т Al		Об. доля СО	Объем воздуха, поступающего в подколокольное пространство при разгерметизации ГСК, м ³ /т Al	Масса кислорода, поступающего под ГСК при его разгерметизации, кг/т Al
	СО	СО ₂			
0,5	179,5	644,3	0,21	411,8	106,0
0,6	212,6	611,2	0,25	329,5	84,8
0,7	245,8	578,0	0,30	247,1	63,6
0,75	266,1	557,7	0,32	196,9	50,7
0,85	297,9	525,9	0,36	118,1	30,4
0,88	307,4	516,4	0,37	94,5	24,3
0,95	329,7	494,1	0,39	39,4	10,1
0,98	338,9	484,9	0,41	15,7	4,0

Геометрические и аэродинамические параметры газосборных колоколов, эксплуатируемых при различной величине силы тока электролизера, могут быть определены по потере давления газового потока, движущегося в подколокольном пространстве [4; 5]:

$$\Delta p_{mp} = \lambda \frac{L\rho\omega^2}{2d_s}; \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{A}{Re}; \quad (4)$$

$$\text{---}; \quad (5)$$

$$\text{---}. \quad (6)$$

где: λ – коэффициент трения; L – длина подколокольного пространства, м; d_s – эквивалентный диаметр подколокольного пространства, м; ρ – плотность газов в подколокольном пространстве, кг/м³; ω – скорость потока, м/с; A – коэффициент, зависящий от формы сечения трубы; Re – число Рейнольдса; μ – динамический коэффициент вязкости анодных газов, Па·с.

При расчете в качестве «эталонных» целесообразно использовать параметры системы газоудаления электролизеров типа С-2 и С-3, на которых впервые стал применяться ГСК, объем образующихся анодных газов не превышал 30 нм³/ч, а эквивалентный диаметр подколокольного пространства составлял 0,32 м.

Сравнительные аэродинамические характеристики ГСК электролизеров С-2, С-3, С-8 и С-8БМ при проектной и достигнутой силе тока, а также с увеличенным эквивалентным диаметром подколокольного пространства приведены на рис. 1 и табл. 2, откуда видно, что снижение потерь давления в подколокольном пространстве достигается увеличением его эквивалентного диаметра с 0,32 до 0,4...0,45 м [6].

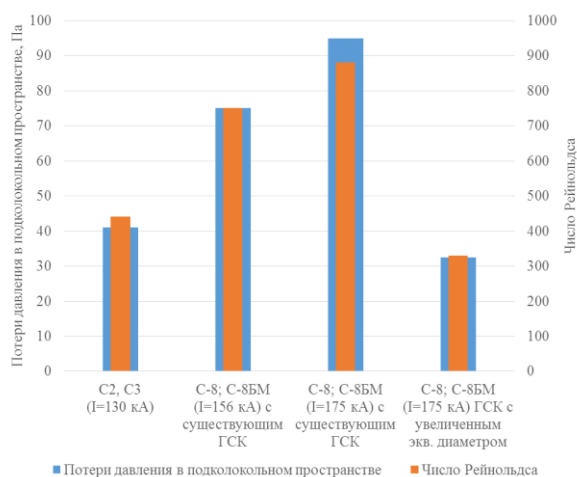


Рис. 1. Аэродинамические характеристики ГСК электролизеров С-2, С-3, С-8 и С-8БМ с существующим и увеличенным эквивалентным диаметрами подколокольного пространства

Сравнительные характеристики параметров газосборного колокола
электролизеров С-2, С-3, С-8 и С-8БМ

№ п/п	Параметр	Ед. изм.	Тип электролизера			
			С2, С3	С-8; С-8БМ с ГСК		
				существующий	с увеличенным d_3	
1	Сила тока	кА	130	156	175	175
2	Объем образующихся анодных газов и поступающих в подколокольное пространство: - при нормальных условиях; - при температуре 950-960°С	нм ³ /ч м ³ /ч	30 110-120	36 130-145	42-45 175-180	
3	Площадь поперечного сечения подколоколь- ного пространства	м ²	0,05	0,05	0,05	0,125
4	Эквивалентный диаметр подколокольного пространства	м	0,32	0,32	0,32	0,4...0,45
5	Средняя скорость газового потока в подколокольном пространстве	м/с	0,6-0,7	0,8-0,85	1,0-1,2	0,4-0,5
6	Потери давления в подколокольном пространстве	н/м ²	41	75	95	30-35
7	Число Рейнольдса		440	750	880	330

Снизить аэродинамическое сопротивление патрубка для установки горелочного устройства возможно за счет изменения его конфигурации, с прямоугольного колена на конфузор. Сопротивление прямоугольного колена зависит от угла его изогнутости, относительного радиуса закругления и относительной вытянутости поперечного сечения и может быть вычислено по формуле [7; 8]:

$$\xi = \xi_{\text{прям}} \cdot \left(\frac{R}{r} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\delta}{90} \right)^{0,5} \quad (7)$$

где ξ – местное сопротивление потоку, создаваемое прямоугольным коленом; $\xi_{\text{прям}}$ – потери давления в колене; ρ – плотность газового потока; v – скорость потока; R – коэффициент, учитывающий влияние угла изогнутости отвода δ (при $\delta = 90^\circ$); L –

коэффициент, учитывающий влияние относительного радиуса — — закругления отвода;
 — коэффициент, учитывающий влияние относительной вытянутости поперечного сечения отвода —; — радиус закругления колена; — диаметр поперечного сечения колена.

В конфузоре, при условии обеспечения угла сужения потока в пределах $10^\circ < \alpha < 40^\circ$, сопротивление ξ минимально ($\xi \approx 0,05$). Обусловлено это тем, что поток не отрывается от стенок в месте перехода в прямой участок и потери давления сводятся только к потерям трения в сужающейся части:

$$\text{---} \quad (8)$$

Использование конфузора снижает коэффициент местного сопротивления патрубка практически в 22 раза (от 1,1 до 0,05).

Таким образом, снижение сопротивления подколокольного пространства и увеличение его эквивалентного диаметра улучшат условия сбора анодных газов и повысит качество укрытия электролизера. Аналогичные мероприятия, осуществленные на зарубежных алюминиевых заводах [9], значительно повысили экологические показатели электролизеров с самообжигающимся анодом.

Горение анодного газа

Расчет горения проведен для сжигаемого в горелках электролизера анодного газа следующего состава, % об.: CO — 37...41; CH₄ — 0,1...3,0; H₂ — 1,5...8,5; CO₂ — 48...60. Средний объемный расход этих компонентов составляет соответственно, нм³/ч: 20,0; 0,78; 2,3; 27,5; 0,55. Расход смолистых веществ (по нафталину) 0,3...0,8 кг/ч.

Необходимые время пребывания сжигаемых компонентов в зоне горения и объем зоны горения определяются по зависимостям [10]:

$$\text{---} \quad (9)$$

$$V_K = \frac{\sum_{i=1}^N W_i Q_i}{q_v}, \quad (10)$$

где $t_{ст}$ — температура в зоне горения, °C; W_i — расход горючих компонентов анодного газа, м³/с; Q_i — теплота сгорания горючих компонентов анодного газа, кДж/м³; q_v — допустимое

теплонапряжение топочного объема, кВт/м³ (для прямоточных топок $q_v \leq 200$ кВт/м³); N – количество видов горючих компонентов анодного газа.

Расчеты показывают, что для дожигания анодных газов электролизера силой тока 170...175 кА необходимы горелка объемом 100...105 дм³ и время нахождения сжигаемых газов в зоне высоких температур от 1,0 до 1,5 с. Отметим, что объем горелок, эксплуатируемых в настоящее время на отечественных заводах, не превышает 70...80 дм³, а время нахождения сжигаемых газов в зоне высоких температур – 0,5 с.

Для полного сгорания анодных газов коэффициент избытка воздуха α при условии хорошего смешения газозвушной смеси должен поддерживаться в пределах 1,1...1,2. На практике же большинство горелок эксплуатируется при $\alpha \approx 6$, так как в них не обеспечивается необходимый уровень смешения анодных газов с воздухом [3]. В этом случае в горелку поступает 330...350 нм³/ч забалластированных (с высоким содержанием негорючих азота и диоксида углерода) анодных газов, что примерно в 4,4 раза превышает расчетные значения. Повысить интенсивность смешения сжигаемых анодных газов с воздухом возможно за счет целенаправленного закручивания газового потока в зоне горения. Для этого горелку целесообразно оснастить винтовыми турбулизаторами, статическим [11] или вращающимся [12], а также дисковыми затворами с выступами, обеспечивающими возможность регулирования объемов удаляемых от электролизера анодных газов [13].

Концентрационные пределы воспламеняемости сжигаемых анодных газов, содержащих балластные примеси, определяются по зависимости [14]:

$$\frac{B}{L} \leq \frac{L_0}{L_0 + B}, \quad (11)$$

где B – доля балластных примесей (N_2 и CO_2); L_0 – нижний или верхний концентрационный предел воспламеняемости горючих газов, не содержащих балластных примесей, % об.:

$$\frac{L_0}{L_0 + B} \leq \frac{L_0}{L_0 + B} \leq \frac{L_0}{L_0 + B} \quad (12)$$

где L_0 – содержание CO , H_2 и CH_4 , % об.; L_0 – нижние или верхние концентрационные пределы воспламеняемости CO , H_2 и CH_4 .

Расчет показывает, что нижний предел воспламеняемости смеси горючих компонентов анодного газа составляет 8,9 % об., верхний – 62,0 % об. При герметичном ГСК, обеспечивающем эффективность сбора загрязняющих веществ на уровне 90 – 98 %, содержание горючих компонентов (СО, Н₂, СН₄) в сжигаемых анодных газах колеблется в пределах 45 – 51 % об. и составляет, в среднем, 48 % об., что достаточно для обеспечения устойчивого горения. Однако в сжигаемых анодных газах содержание балластных примесей при $\alpha=6$ достигая 93 % об., что незначительно уменьшает нижний предел воспламеняемости, до 6,5% об., и существенно - верхний, до 31,1% об., что видно из результатов расчета, приведенных в таблице 3.

Таблица 3

Концентрационные пределы воспламеняемости анодных газов при различных значениях α

α	Концентрация горючих компонентов, % об.		Б, доли ед.	%, об.	%, об.
	на входе в горелку	в горелке			
1,0	48,0	25,3	0,69	6,5	31,1
1,15		21,8	0,71	6,6	31,7
1,5		16,7	0,77	7,1	33,5
2,0		12,6	0,81	7,5	34,7
2,5		10,1	0,84	7,7	35,5
3,0		8,4	0,86	7,9	36,0
3,5		7,2	0,88	8,0	36,5
4,0		6,3	0,89	8,1	36,8
4,5		5,5	0,90	8,2	37,0
5,0		5,0	0,91	8,3	37,3
5,5		4,6	0,92	8,4	37,5
6,0		3,8	0,93	8,5	37,8

Из табл. 3 видно, что при $\alpha \geq 3,5$ концентрация горючих компонентов в горелке становится меньше их нижнего концентрационного предела воспламеняемости, что доказывает необходимость изменения технологии дожига анодных газов алюминиевых электролизеров.

Аналогичный вывод можно сделать, анализируя фактические температуры в зоне горения и температуры, необходимые для дожигания смолистых веществ, содержащихся в анодных газах. Зависимость температуры в зоне горения от избытка и температуры подсосываемого воздуха, представленная на рис. 2 показывает, что для обеспечения в зоне горения температуры 1200 °С, достаточной для сжигания бенз(а)пирена [15], коэффициент α в зимнее время года не должен превышать значения 1,15, в летнее –

1,2...1,25. Превышение $\alpha \square 2,5$ снижает температуру до минимально допустимого значения (610°C), при котором происходит самовоспламенение оксида углерода, основного горючего компонента анодных газов.

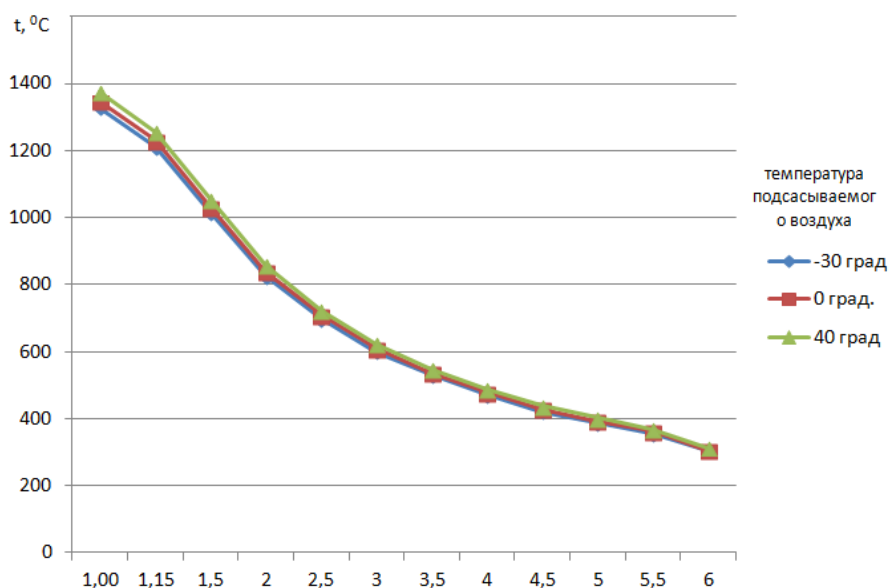


Рис. 2. Зависимость температуры в зоне горения от коэффициента α и температуры подсасываемого воздуха

Для смолистых веществ, содержащихся в сжигаемых анодных газах, нижние ($t_{\text{н}}$) и верхние ($t_{\text{в}}$) температурные пределы воспламенения могут быть определены по формулам, учитывающим число связей и бензольных колец в их молекулах [16]:

$$; \quad (13)$$

$$, \quad (14)$$

где n – число связей и структурных групп вида C-C в молекуле. Для c1ccccc1 значение n для бензола равно 6, для нафталина равно 10, для антрацена равно 14, для флуорантена равно 18, для пирена равно 22, для бенз(а)пирена равно 26, для бенз(а)антрацена равно 30, для бенз(а)пирена равно 34, для бенз(а)пирена равно 38, для бенз(а)пирена равно 42, для бенз(а)пирена равно 46.

Для нафталина, температура кипения которого 218°C , а молекула состоит из двух бензольных колец и имеет 24 связи, температурные пределы воспламеняемости находятся в диапазоне $290 - 330^{\circ}\text{C}$, для бенз(а)пирена, температура кипения которого 495°C , а молекула состоит из пяти бензольных колец и имеет 46 связей – от 1270 до 1330°C . Таким образом, полученная расчетным путем температура воспламенения бенз(а)пирена на 5 – 10 % превышает данные, полученные в рамках экспериментальных исследований,

изложенных в [14] и доказывает целесообразность эксплуатации горелок с избытком воздуха $\alpha = 1,1 \dots 1,2$.

Необходимость изменения технологии дожига анодных газов алюминиевых электролизеров и увеличения объема горелки также доказывает анализ скорости распространения пламени. Максимальная нормальная скорость распространения пламени в смеси горючих компонентов анодного газа с воздухом в неподвижной среде может быть определена по формуле:

$$\text{-----}, \quad (13)$$

где α – содержание компонента в сжигаемой газовой смеси, % об.; v_{max} – максимальная скорость распространения пламени при горении в воздухе

Фактическая скорость распространения пламени в сжигаемых анодных газах, содержащих значительное количество балластных примесей (N_2 и CO_2) определяется по формуле:

$$(14)$$

Расчеты показывают, что скорость распространения пламени при горении в воздухе составляет 0,76 м/с, в среде, содержащей балластные примеси - 0,21 м/с. В соответствии с данными, приведенными в табл. 4, при $\alpha \square 3,5 \dots 4,0$ скорость газового потока в горелке объемом 70...80 дм³ в 5...12 раз превышает скорость распространения пламени, в горелке объемом 100...105 дм³ - в 2,5 – 7 раз, что не только снижает температуру и время пребывания сжигаемых анодных газов в зоне горения, но и несет риск срыва пламени потоком.

Таблица 4

Зависимость скорости газового потока и времени нахождения анодного газа в зоне горения от избытка воздуха

α	Расход газов, нм ³ /с		Скорость потока, м/с, в горелке объемом, дм ³		Время, с, нахождения горючих компонентов в зоне высоких температур горелки объемом, дм ³	
	вход в горелку	в зоне горения	70...80	100...105	70...80	100...105
1,0	0,0133	0,08	1,03	0,57	0,97	1,54
1,15	0,0153	0,085	1,08	0,61	0,93	1,46
1,5	0,02	0,097	1,17	0,70	0,87	1,32
2,0	0,026	0,107	1,29	0,77	0,80	1,22
2,5	0,033	0,112	1,35	0,80	0,77	1,19
3,0	0,04	0,132	1,59	0,95	0,67	1,03

3,5	0,046	0,144	1,74	1,04	0,62	0,96
4,0	0,053	0,147	1,77	1,06	0,60	0,94
4,5	0,06	0,156	1,88	1,12	0,57	0,90
5,0	0,067	0,165	1,99	1,19	0,55	0,86
5,5	0,073	0,171	2,06	1,23	0,53	0,83
6,0	0,088	0,189	2,28	1,36	0,48	0,76

* при температуре воздуха, подсасываемого в зону горения, 40⁰С

Газоходная сеть корпуса электролиза

На зарубежных алюминиевых заводах снижение энергозатрат на транспортировку анодных газов обеспечивается уменьшением протяженности газоходных сетей [17], а также охлаждением газов в теплообменниках: пластинчатых [18], с оребренными овальными трубами [19], кожухотрубных [20], или за счет разделения сети на газоходные каналы с целью увеличения площади теплоотдающей поверхности [21].

В условиях Российских алюминиевых заводов, эксплуатирующих электролизеры с самообжигающимся анодом, целесообразно снижение энергозатрат на транспортировку анодных газов за счет снижения сопротивления сети. Суммарное аэродинамическое сопротивление газоходной сети корпуса электролиза составляет около 2000 Па, на преодоление которого затрачивается до 30 % мощности дымососов, удаляющих анодные газы от электролизеров в газоочистные установки. Снизить сопротивление сети возможно заменой тройников, соединяющих горелку с газоходной сетью. В настоящее время на газоходных сетях, как правило, эксплуатируются тройники, в которых сумма площадей поперечных сечений бокового и прямого участков превышает площадь поперечного сечения сборного участка $F_{\text{п}} + F_{\text{б}} > F_{\text{с}}$. Для тройников этого типа коэффициент сопротивления определяется зависимостью [8]:

$$\xi = \xi_{\text{пр}} + \xi_{\text{б}} - \xi_{\text{с}}, \quad (15)$$

где $G_{\text{пр}}$, $G_{\text{б}}$, $G_{\text{с}}$ – расход газ в прямом, боковом и сборном рукавах тройника; $F_{\text{пр}}$, $F_{\text{б}}$, $F_{\text{с}}$ – площади поперечного сечения прямого, бокового и сборного рукавов тройника; α – угол ввода бокового рукава в тройник; $\xi_{\text{тр}}$ – коэффициент сопротивления тройника при условии $F_{\text{п}} + F_{\text{б}} = F_{\text{с}}$.

Для тройников, в которых сумма площадей поперечных сечений прямого участка и бокового отвления равна площади поперечного сечения сборного рукава $F_{\text{п}} + F_{\text{б}} = F_{\text{с}}$, коэффициент сопротивления определяется зависимостью:

$$\xi = \xi_{\text{пр}} + \xi_{\text{б}} - \xi_{\text{с}}, \quad (16)$$

где v_1 , v_2 , v_3 - скорости потока в прямом, боковом и сборном рукавах тройника; S_1 , S_2 , S_3 - площади поперечного сечения прямого, бокового и сборного рукавов тройника; ξ - коэффициент сопротивления тройника при условии $F_1 + F_2 = F_3$.

Расчеты по представленным зависимостям показывают, что наименьшее сопротивление создают тройники типа $F_1 + F_2 = F_3$ с углом ввода бокового рукава в сборный газоход от 15° до 30° (рис. 3) Использование этих тройников обеспечит в 1,5...3 раза снизит сопротивление, а также уменьшит удельный расход электроэнергии на транспортировку анодных газов по газоходной сети с 55...60 кВт·ч/тAl до 40...45 кВт·ч/тAl.

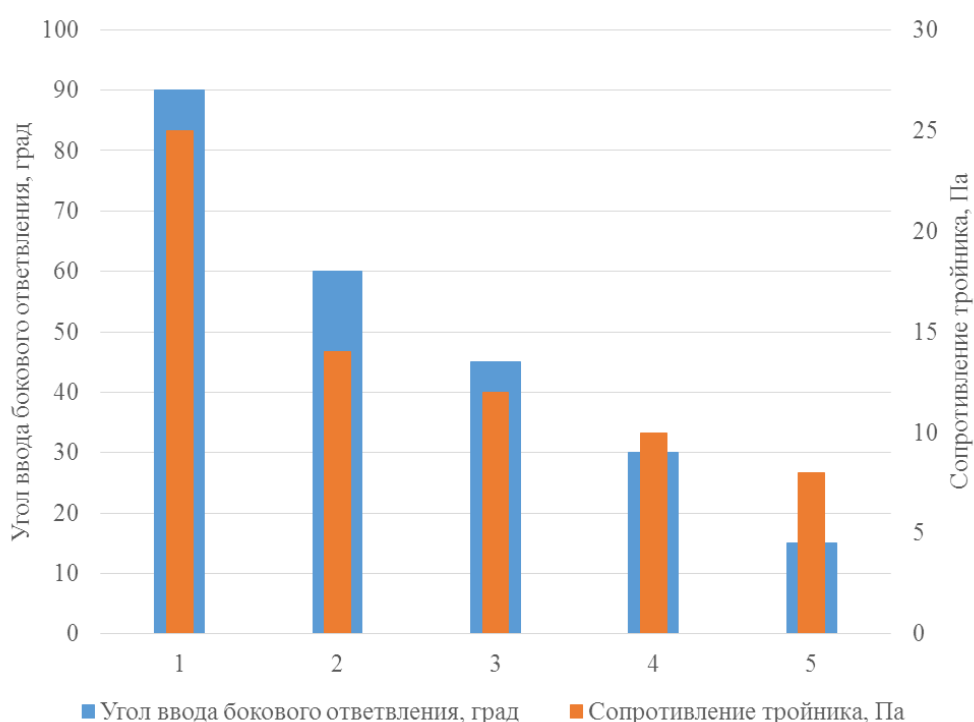


Рис. 3. Характер изменения сопротивления тройника при различных углах ввода бокового ответвления и соблюдении условия $F_1 + F_2 = F_3$

Выводы

1. Использование в рамках настоящей работы известных методик и зависимостей расчета состава и количества вредных веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух при производстве алюминия, определения местных сопротивлений и сопротивлений каналов, параметров сжигания газового топлива позволили получить оригинальные данные по объему анодных газов, образующихся в электролизерах с самообжигающимся анодом различной силы тока, геометрическим характеристикам ГСК и горелок и

технологическим величинам дожига горючих компонентов анодного газа. Получены новые данные по величине эквивалентного диаметра подколольного пространства, обеспечивающего существенное снижение сопротивления движущемуся в нем газовому потоку.

2. Расчетным путем доказана целесообразность увеличения объема горелки с 70...80 до 100...105 дм³, и дожига в ней анодных газов с $\alpha = 1,05 \dots 1,2$. При таком избытке воздуха время нахождения сжигаемых анодных газов в зоне высоких температур горелки объемом 100...105 дм³ превышает 1 с.

3. Получены уточненные данные по температуре, необходимой для термического обезвреживания бенз(а)пирена, содержащегося в сжигаемых анодных газах. Новые данные, 1270 ÷ 1330°С, на 5 ÷ 10 % выше полученных ранее, более 40 лет назад, другими исследователями.

4. С использованием методики доказана целесообразность снижения аэродинамического сопротивления газоходной сети. В общей сложности оптимизация объемов газоотсоса в пределах $\alpha = 1,05 - 1,2$ и снижение аэродинамического сопротивления газоходной сети сокращает удельные энергозатраты на транспортировку анодных газов на 15...20 кВт·ч/тAl.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта №17-48-240595 р_а.

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. Расчетная инструкция (методика) по определению состава и количества вредных (загрязняющих) веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух при электролитическом производстве алюминия (в ред. приказа Ростехнадзора от 29.11.2005 №892 / СПС Консультант Плюс.

3. Буркат, В.С. Сокращение выбросов в атмосферу при производстве алюминия / В.С. Буркат, В.А. Друкарев. С-Пб.: ООО «Любавич», 2005 - 275 с.

-
4. 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.
 5. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию. - М.: Химия. - 1991, - 496 с.
 6. Пат. 2324012 РФ. Газосборное устройство алюминиевого электролизера (варианты). / Шахрай С.Г., Куликов Б.П., Петров А.М.; заявл. 26.04. 2006; опубл. 10.05.2008, Бюл. №13.
 7. Гонцов, Г.Н. Турбулентное течение на участке поворота круглой трубы / Н.Г. Гонцов, О.А. Маринова, А.В. Тананаев // Гидротехническое строительство. 1984. №12. С. 24-28.
 8. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик, под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд. перераб. и доп.. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
 9. Mike Barber and Alton T. Tabereaux. The end of an era for soderberg technology in north and south america / Light Metals 2014, pp. 809-814.
 10. Зиганшин, М.Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин. – М.: Экопресс-ЗМ, 1988. – 505 с.
 11. Патент 2456380 РФ. Горелочное устройство алюминиевого электролизера с интенсивным смешиванием компонентов / Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Баранов А.Н. и [др.]; заявл. 09.02.2011; опубл. 20.07. 2012, Бюл. №20.
 12. Патент 164940 РФ. Горелочное устройство алюминиевого электролизера с интенсивным смешиванием компонентов / Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Белянин А.В. и [др.]; заявл. 08.12.2015; опубл. 27.09.2016, Бюл. №27.
 13. Патент 2534712 РФ. Устройство для дожигания анодных газов алюминиевого электролизера / Шахрай С.Г., Бажин В.Ю., Кондратьев В.В. и [др.]; заявл. 27.06.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. №34.
 14. Стаскевич, Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.
 15. Климова Л.Л., Павлюченко Г.А., Белов Б.А. Сравнительная оценка различных горелочных устройств для алюминиевых электролизеров. // Цветная металлургия. - 1979. - № 19. - С. 54 – 56.
 16. Померанцев В.В. Основы практической теории горения: уч. пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и [др.]. /Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

-
17. Anita Folkers, Jan de Weerdt, Peter Klut, Erik Dupon, Edo Engel. 15 Years of GTC Operation at aldel: long-term assessment of GTC performance // Light Metals, 2014. P.629-633.
 18. Peter Verbraak, Travis Turco, Peter Klut, Erik Dupon, Edo Engel. Pot gas cooling technologies // Light Metals, 2014. P.635-639.
 19. El Hani Bouhabila, Erling Næss, Victoria Kielland Einejord and Kolbeinn Kristjansson. An innovative compact heat exchanger solution for aluminum off-gas cooling and heat recovery // Light Metals, 2013. P.793-797.
 20. El Hani Bouhabila, Bernard Cloutier, Thierry Malard, Philippe Martineau, Hugues Vendette. Electrolytic cell gas cooling upstream of treatment center. «Light Metals 2012», p. 545-550.
 21. Khawla AlMarzooqi, Shaikha AlShehhi, Vijayakumar Pillai, Muna Abdulla, Sunny John, Padmaraj Gunjal, Bharat Gadilkar. Management and performance of the largest gas treatment centre at emal potline during major shutdown of main exhaust fans / Light Metals 2016, p.p. 447-452.