

УДК 669.71: 662.76

**Оценка влияния коагуляции и седиментации пылевых частиц на устойчивость работы горелок алюминиевого электролизера**

Шахрай С.Г., Дектерев А.А., Скуратов А.П., Климович Л.В.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

**Введение**

Одна из проблем, возникающих при эксплуатации горелок дожига анодных газов алюминиевого электролизера, заключается в периодическом погасании горения. В эти периоды в газоходную сеть выносятся несгоревшие смолистые вещества, содержащиеся в сжигаемых анодных газах. По мере охлаждения смолистые вещества конденсируются, и на них из газового потока интенсивно осаживаются пылевые частицы, содержащиеся в удаляемых газах. Таким образом, в газоходной сети образуются отложения, уменьшающие полезную площадь поперечного сечения газоходов.

Причины погасания горения кроются в изменении качественного состава поступающего в горелку анодного газа при разгерметизации газосборного колокола (ГСК), когда горение происходит непосредственно в подколокольном пространстве, а также вследствие его забивания оплесами и отложениями, препятствующими доступу газа в горелку. Помимо этого, погасание может происходить и в результате роста концентрации пыли вследствие ее коагуляции и образования конгломератов крупностью до 400 мкм и более. Аналогичные процессы происходят и в газоходной сети, что усугубляет проблему образования в ней отложений.

В статье представлены результаты оценки интенсивности коагуляции и седиментации пылевых частиц, а также их влияния на устойчивость работы горелок алюминиевого электролизера.

**Ключевые слова:** алюминиевый электролизер, горелка, анодные газы, дожиг, пыль, коагуляция, седиментация, погасание

**Механизм коагуляции в горелке пылевых частиц**

Технология производства алюминия в электролизерах Содерберга имеет ряд преимуществ, поэтому любые ее улучшения позволяют получить конкурентные

преимущества перед технологией получения алюминия в электролизерах с обожженным анодом [1]. В последние годы улучшение экологических показателей технологии Содерберга достигнуто за счет внедрения точечного питания электролизеров глиноземом, уменьшения частоты анодных эффектов, совершенствования укрытий и сокращения содержания пека в анодной массе [2]. Помимо этого, повысить экологическую безопасность производства алюминия в электролизерах Содерберга возможно повышением устойчивости работы горелок дожига анодных газов, за счет оптимизации подсосываемого в них воздуха [3], а также предотвращения погасания, вызванного ростом концентрации пыли в зоне горения.

При электролитическом производстве алюминия образуется пылегазовая смесь, которая собирается в укрытии колокольного типа [4]. Анодные газы из колокольного укрытия через две щелевые горелки, в которых происходит сгорание смолистых веществ и горючих газовых компонентов, по газовой сети удаляются в газоочистные установки на окончательную очистку. Средняя концентрация пыли в поступающих в горелку анодных газах составляет  $35 \text{ г/м}^3$  [5]. Качественный состав дисперсной фазы анодных газов представлен фтористыми солями, глиноземом и коксом, уносимыми в систему газоудаления в результате пыления сырья при его агрузке в электролизер, а также вследствие низкой механической прочности анода в условиях высокой силы тока [6], и высокой респираторной способности кокса и связующего пека в  $\text{CO}_2$  и на воздухе, поступающем под ГСК [7; 8]. Дисперсный состав пыли представлен, преимущественно, частицами размером от 2 до 30 мкм. При среднем объеме сжигаемых в горелке анодных газов  $20 - 22 \text{ м}^3/\text{ч}$  [9], количество поступающей в нее пыли составляет  $700 - 770 \text{ г/ч}$ . Из этого количества от 90 до 95 % захватывается газовым потоком и уносится в систему газоотсоса. Остальные пылевые частицы при столкновении друг с другом коагулируют (слипаются), образуя, таким образом, конгломераты размером 400 мкм и более, остающиеся в горелке. В горелке одновременно происходит три вида коагуляции частиц – тепловая, вызванная в среде с высокими температурами броуновским движением мелкодисперсных частиц размером до 2 мкм, на которых сорбировано более 80 % смолистых веществ [10], турбулентная, вызванная пульсациями газовой среды и частиц, и кинетическая (гравитационная), вызванная различной скоростью частиц, приобретаемой под действием внешних сил.

Количество частиц, соприкоснувшихся под действием тепловых сил за время  $t$ , зависит от расстояния, на котором они (частицы) находятся от центра поглощающей среды и может быть представлено в виде [11]:

где:  $n$  - счетная концентрация аэрозоля;  $\rho$  - поглощающая среда (неподвижная частица) с радиусом  $r$  - вероятность того, что центр частицы, находящейся в момент  $t$  на расстоянии  $r$  от центра поглощающей сферы, соприкоснется с ней за время  $t$ . Так как функция  $\exp(-2nr^2)$  очень быстро убывает по мере увеличения  $r$ , верхним пределом в интеграле, вместо радиуса горелки, можно взять бесконечность.

За время  $t$  с неподвижной частицей соприкоснется:

$$N = n \int_0^{\infty} 4\pi r^2 \exp(-2nr^2) dr$$

частиц, а за время  $(0, t)$ :

$$N = \frac{4\pi n}{3} \int_0^{\infty} r^3 \exp(-2nr^2) dr$$

где:  $D$  - коэффициент молекулярной диффузии частиц

Из (2) следует, что при  $D \ll r^2$  средний промежуток времени между двумя столкновениями равен  $\frac{1}{N}$ . Коэффициент молекулярной диффузии коллоидных (пылевых частиц) определяется из уравнения Эйнштейна:

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$$

где:  $k$  - постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $\eta$  - коэффициент трения коллоидной частицы о вещество дисперсной среды

Для сферических несжимаемых частиц, движущихся бесконечно медленно с постоянной скоростью в непрерывной несжимаемой среде так, что газ не скользит по поверхности частиц, по закону Стокса:

где:  $\eta$  - вязкость среды;  $r$  - радиус частиц

Таким образом:

$$N = \frac{4\pi n}{3} \int_0^{\infty} r^3 \exp(-2nr^2) dr$$

где:  $N_A$  - число Авогадро

Из уравнения (6), полученного Эйнштейном в 1905 г. видно, что коэффициент молекулярной диффузии и скорость диффузии — не зависят от массы частиц, но зависят от их размеров.

Переходя к коагуляции полидисперсных аэрозолей, каковой является пыль, содержащаяся в анодных газах, предположим вначале, что в аэрозоле присутствуют два рода частиц: с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ . Константу коагуляции (число соприкосновений частиц 1-ого и 2-ого рода) в этом случае можно выразить следующим образом:

$$\text{---} \quad \text{---}$$

где: — поправочный множитель, для случая частиц неодинакового размера равный:

$$\frac{\text{---}}{\text{---} \quad \text{---}}$$

где: —; —; —; —;  $G_1, G_2$  — общий вес частиц размером ; — расстояние, на котором проходят частицы от центра коагуляции; — толщина диффузионного слоя у стенки; — средняя скорость молекул газовой среды

Результаты расчета констант коагуляции частиц различных радиусов при 1200°C (горелка, работающая в оптимальном режиме) и 350°C (погасшая горелка), приведенные в табл. 1 показывают, что в горелке, работающей в оптимальном режиме интенсивность тепловой коагуляции частиц на 25 – 30 % выше, чем в погасшей. При этом наиболее интенсивно коагулируют частицы размером 2 и 4 мкм, наименее интенсивно — частицы размером 8 и 10 мкм. Интенсивность коагуляции частиц в диапазоне от 4 до 8 мкм и от 10 до 30 мкм находится практически на одном уровне. Объяснить это можно снижением плотности и ростом вязкости газов при увеличении температуры (работающая горелка).

Таблица 1

**Константы коагуляции частиц неодинаковой величины,  $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$**

r, мкм	Объем частицы, $\text{м}^3$	, м/с	, м	Коэффициент молекулярной диффузии при температуре, °C		Константа коагуляции K при температуре, °C	
				1200	350	1200	350
2	$1,33\text{E}^{-18}$	$3,99\text{E}^{-15}$	0,0000015	$1,95\text{E}^{-11}$	$1,55\text{E}^{-11}$	$5,51\text{E}^{-16}$	$4,3\text{E}^{-16}$
4	$8\text{E}^{-18}$	$2,4\text{E}^{-14}$	0,0000025	$9,75\text{E}^{-12}$	$7,31\text{E}^{-12}$	$5,1\text{E}^{-16}$	$3,82\text{E}^{-16}$
6	$2,7\text{E}^{-17}$	$8,1\text{E}^{-14}$	0,0000035	$6,5\text{E}^{-12}$	$4,87\text{E}^{-12}$	$5,0\text{E}^{-16}$	$3,75\text{E}^{-16}$

8	$6,4E^{-17}$	$1,92E^{-14}$	0,0000045	$4,88E^{-12}$	$3,65E^{-12}$	$4,96E^{-16}$	$3,71E^{-16}$
10	$1,25E^{-16}$	$3,75E^{-13}$	0,00000625	$3,9E^{-12}$	$2,92E^{-12}$	$5,1E^{-16}$	$3,82E^{-16}$
15	$4,21E^{-16}$	$1,26E^{-12}$	0,00000875	$2,6E^{-12}$	$1,95E^{-12}$	$5,0E^{-16}$	$3,75E^{-16}$
20	$1E^{-15}$	$3E^{-12}$	0,0000125	$1,95E^{-12}$	$1,46E^{-12}$	$5,1E^{-16}$	$3,82E^{-16}$
30	$3,38E^{-15}$	$1E^{-11}$		$1,3E^{-12}$	$9,75E^{-13}$		

Более частая встреча частиц в турбулентном потоке обусловлена разностью плотностей среды и дисперсной фазы. Частицы разных размеров увлекаются турбулентными пульсациями, движутся с различными скоростями и поэтому чаще сталкиваются друг с другом.

Средняя квадратичная относительная пульсационная скорость двух частиц турбулентной среды в направлении линии их центров может быть определена из выражения:

$$\frac{v_{rel}}{v} = \frac{2 \cdot \nu \cdot \omega}{r \cdot v}$$

где:  $r$  - расстояние между частицами;  $\nu$  - кинематическая вязкость среды;  $\omega$  - скорость диссипации турбулентной энергии в  $1 \text{ см}^3$  среды

Среднюю квадратичную скорость относительного движения частиц и среды определяют из выражения:

где:  $\tau$  - время релаксации частицы;  $a$  - среднее квадратичное ускорение в турбулентном потоке

Также можно выразить через частоту пульсаций  $\omega$ :

$$\frac{v_{rel}}{v} = \frac{2 \cdot \nu \cdot \omega}{r \cdot v}$$

где:  $v_{rel}$  - средняя квадратичная пульсационная скорость

В случае  $\omega \ll \frac{v}{r}$  выражение (11) можно преобразовать к виду:

Далее, из свойств гармонических колебаний следует  $\frac{v_{rel}}{v} = \frac{2 \cdot \nu \cdot \omega}{r \cdot v}$ , следовательно,  $\frac{v_{rel}}{v} = \frac{2 \cdot \nu \cdot \omega}{r \cdot v}$ .  
Относительная скорость двух частиц, расстояние между которыми мало по сравнению с масштабом пульсации, равна:

(13)

Так как относительное движение частиц и среды возможно лишь при пульсациях с масштабом  $<$ , период которых  $t_p$  уже не зависит от масштаба, то максимальная величина ускорения составит:

$$\text{---} \quad \text{---}$$

Коэффициент диффузии за счет пульсаций с масштабом  $<$ , соответственно, определяется из выражения:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (15)$$

из которого следует, что скорость диффузии двух частиц друг к другу в турбулентной среде уменьшается по мере их сближения.

Общее число частиц, достигших поглощающей среды за счет турбулентных пульсаций определяется по формуле:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (16)$$

где:  $<$  - начальная концентрация аэрозоля (счетная концентрация аэрозоля)

Из выражения (16) следует, что интенсивность турбулентной коагуляции возрастает с увеличением радиуса пылевых частиц и температуры в зоне горения, повышающей вязкость газовой фазы.

Погасание горелок напротив, снижает интенсивность коагуляции частиц, уменьшает вязкость газовой фазы, увеличивает скорость релаксации и снижает время седиментации частицы.

Осаждение частиц различных размеров с различными скоростями сопровождается их кинематической (гравитационной) коагуляцией. Число мелких частиц, захваченных в 1 с крупной частицей с радиусом  $R$  можно определить по формуле:

$$(17)$$

где:  $<$  - коэффициент захвата (осаждения), который в случае стоксовского закона сопротивления определяется из выражения:

где:  $r_1$  - радиус крупной частицы;  $v$  – скорость движения пылегазовой смеси (аэрозоля);  $r_2$  - радиус мелкой частицы;  $q$  - заряд частицы.

### Рост концентрации конгломератов и их седиментация в горелке

При обычных условиях установившаяся скорость относительного движения частиц (равная скорости седиментации) диаметром до 100 мкм соответствует режиму обтекания Стокса и может быть определена по формуле:

где:  $\rho$  - плотность дисперсной фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  - размер пылевых частиц, м;  $\mu$  - динамическая вязкость газовой среды.

При расчетах принята плотность пылевых частиц 3000 кг/м<sup>3</sup>, что является усредненной величиной плотностей частиц, содержащихся в дисперсной фазе (табл. 2).

Таблица 2

#### Химический состав и истинная плотность составляющих дисперсной фазы анодных газов

Компонент пыли	Содержание в дисперсной фазе, % масс.	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Глинозем	30	3990
Кокс	30	1900
Фтористые соли (криолит, фторид алюминия)	30	3000
Прочие	10	3000

Вязкость газовой смеси определяли по зависимости:

где:  $\mu$  – вязкость газовой смеси при температуре  $T$ ;  $\mu_i$  - вязкости компонентов газовой смеси – CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> при температуре  $T$ ;  $V_i$  - объемные доли компонентов газовой смеси – CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>;  $M_i$  – молекулярные массы

компонентов газовой смеси – CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>; – критические температуры компонентов газовой смеси – CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>.

Вязкость каждого компонента газовой смеси определялась по формуле:

где:  $\mu$  – вязкость компонента при 0<sup>0</sup>C;  $T$  – температура компонента, К; С – константа, значение которой взяты из [12] и приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения константы С

Компонент	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Значение С	100	73	162	114	131

Размеры дисперсных частиц, от 30 до 400 мкм и выше, взяты по результатам ситового анализа пыли, осевшей в газоподводящем патрубке горелки. Взаимовлияние избытка воздуха, температуры в зоне горения, вязкости газовой смеси и размеров частиц пыли на скорость их седиментации представлены в табл. 4 и на рис., сравнительные скорости газового потока и седиментации пылевых частиц в горелках – в табл. 5.

Таблица 4

**Температура в зоне горения, вязкость газовой смеси, размеры частиц пыли и скорость их седиментации**

$\alpha$	$T$ в зоне горения, °C	$\mu$ газовой смеси, 10 <sup>6</sup> н·сек/м <sup>2</sup>	Скорость седиментации частиц размером, мкм					Скорость потока в горелках, м/с,
			30	50	100	200	400	
1	1600	59,82	0,025	0,07	0,28	1,11	4,45	1,66
1,15	1460	59,1	0,025	0,072	0,287	1,15	4,62	1,83
1,5	1224	55,2	0,027	0,075	0,301	1,20	4,83	1,77
2,0	996	50,4	0,029	0,082	0,33	1,32	5,29	1,87
2,5	841	47,12	0,031	0,088	0,353	1,41	5,69	1,96
3,0	724	44,43	0,033	0,093	0,375	1,50	6,00	2,05
3,5	636	42,17	0,035	0,098	0,395	1,58	6,32	2,13
4,0	568	40,33	0,037	0,103	0,41	1,65	6,61	2,22
4,5	508	38,71	0,038	0,107	0,43	1,72	6,89	2,29
5,0	467	37,8	0,039	0,11	0,44	1,76	7,05	2,38
5,5	430	33,7	0,044	0,125	0,494	1,98	7,91	2,47
6,0	364	31,74	0,047	0,131	0,525	2,10	8,40	2,42



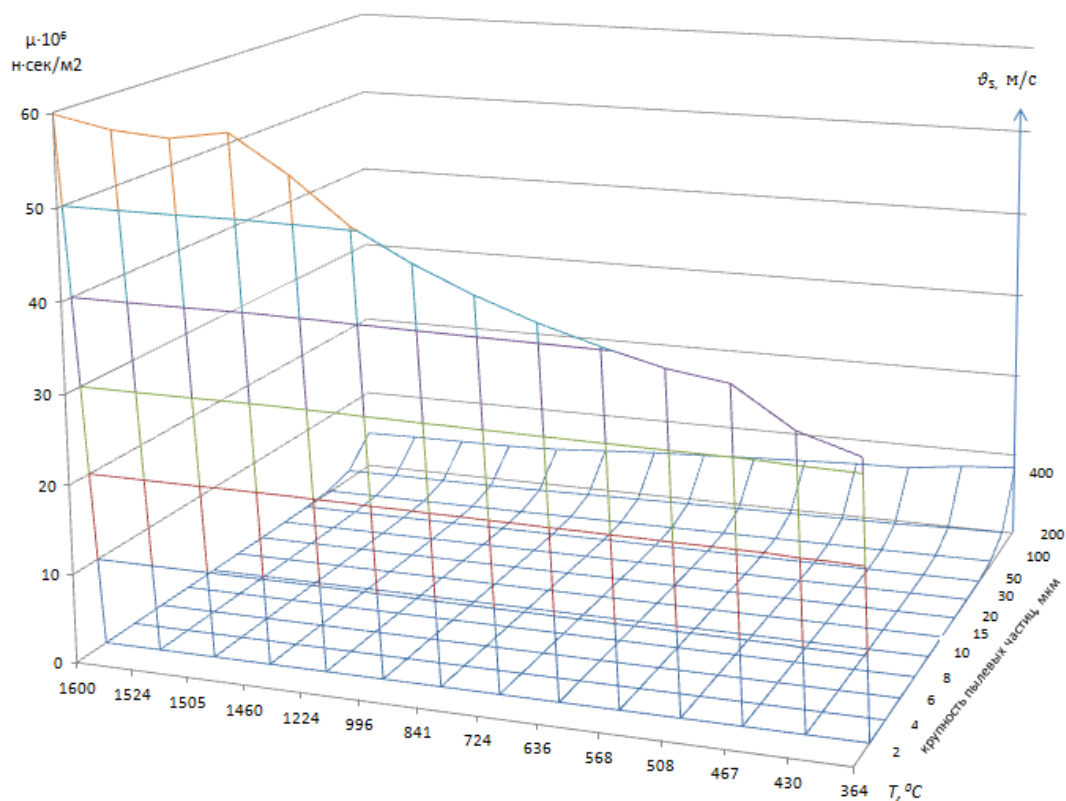


Рис. Взаимовлияние избытка воздуха, температуры в зоне горения, вязкости газовой смеси и размеров частиц пыли на скорость их седиментации

Данные, представленные в табл. 4 показывают, что скорость седиментации частиц размером 400 мкм превышает скорость потока, а частиц размером 200 мкм близка к скорости потока при любых значениях  $\alpha$ . Таким образом можно предположить, что в горелке во взвешенном состоянии находятся конгломераты размером от 200 до 300 мкм. Химический состав конгломератов, в соответствии с данными табл. 2, на 70 % представлен ингибирующими компонентами – глиноземом и фтористыми солями, и рост их концентрации в горелке способен привести к погасанию горения. Согласно [13], при содержании в сжигаемых газах 50% масс. инертной пыли, аэровзвеси теряют способность распространять пламя. Исходя из сказанного, можно оценить характерное время достижения критической концентрации конгломератов, приводящей к погасанию горения. Эта величина составляет 3,5 – 6,5 ч., что коррелируется с данными продолжительных натуральных наблюдений устойчивости работы горелок промышленных электролизеров.

Предотвратить рост концентрации конгломератов и вызванное этим погасание горелки возможно за счет целенаправленной периодической подачи в горелку сжатого воздуха [14]. При это импульсы сжатого воздуха, за счет действия дополнительной силы, связанной с относительным ускорением среды вокруг частицы, и роста градиента давления, будут захватывать и уносить конгломераты в систему газоудаления [15].

## Выводы

Выполненная оценка интенсивности коагуляции и скорости седиментации пылевых частиц показала, что в горелке алюминиевого электролизера образуются конгломераты размером 400 мкм и выше, и рост их концентрации способен привести к погасанию горения. При этом приводящая к погасанию критическая концентрация пыли в горелке достигается в течение 3,5 – 6,5 часов. Предотвратить достижение критической концентрации конгломератов возможно за счет целенаправленной периодической подачи в горелку импульсов сжатого воздуха. Возникающая при этом дополнительная сила, связанная с относительным ускорением среды вокруг частицы, и рост градиента давления, будут способствовать захвату и уносу конгломератов в систему газоудаления.

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. A.K. Syrdal. The Söderberg Cell Technology – Future Challenges and Possibilities / Light Metals 2002, pp. 319-325.
  2. Mike Barber and Alton T. Tabereaux. The end of an era for søderberg technology in north and south america / Light Metals 2014, pp. 809-814.
  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-2015, Красноярск, 14-18 сент. 2015, С. 146-147.
  4. Л.С. Безбородов, В.В. Васильев, А.А. Дектерев и [др.]. Оптимизация системы газоочистки электролизного производства алюминия с целью повышения ее пожаровзрывобезопасности. Сибирский вестник пожарной безопасности. №3-4, 1999 г., с. 26-46.

- 
5. Куликов, Б.П. Пылегазовые выбросы алюминиевых электролизеров с самообжигающимися анодами: монография / Б.П. Куликов, Ю.И. Сторожев. – Красноярск, изд-во СФУ, 2012 – 268 с.
  6. Dag Herman Andersen and Hogne Linga. Evaluating the Crack Resistance of Carbon Anodes: Implementation of a Measurement System for Tensile Strength and Fracture Toughness / Light Metals, 2015. – p.p. 1123 – 1128.
  7. Khalil Khaji, Mohammed Al Qassemi. Factors influencing baked anode properties / Light Metals, 2015. – p.p. 1135 – 1140.
  8. Camilla Sommerseth, Rebecca Jayne Thorne, Stein Rorvik and etc. Spatial methods for characterising carbon anodes for aluminium production / Light Metals, 2015. – p.p. 1141 – 1146.
  9. 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.
  10. Буркат, В.С. Сокращение выбросов в атмосферу при производстве алюминия / В.С. Буркат, В.А. Друкарев. – СПб., 2005. – 275 с.
  11. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – М.: изд-во АН СССР. – 1955 – 352 с.
  12. 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.
  13. Корольченко, А.Я. Процессы горения и взрывы / А.Я. Корольченко, М.: М.: Пожнаука, 2007. – 266 с. Пожнаука, 2007. – 266 с.
  14. Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Пузин А.В. Способ очистки горелочного устройства и газоходной сети алюминиевого электролизера. Патент РФ №2437966, заявл. 30.10.2010, опубл. 27.12.2011 г., бюл.№36.
  15. Сугак Е.В., Кузнецов Е.В., Шахрай С.Г. Динамика газодисперсного потока в вертикальном канале / Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева, 2005, вып.7, с.18-23.