

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ СОДЕРБЕРГА

© 2017 г. **А.М. Виноградов, А.А. Пинаев, Д.А. Виноградов, А.В. Пузин, В.Г. Шадрин,  
Н.В. Зорько, В.В. Сомов**

ООО «РУСАЛ ИТЦ», г. Красноярск

*Статья поступила в редакцию 02.02.16 г., доработана 17.03.16 г., подписана в печать 21.03.16 г.*

Получение алюминия на электролизерах Содерберга сопряжено с выбросами в атмосферу большого количества загрязняющих веществ, включая газообразные и плохо растворимые фториды. В настоящее время рядовые электролизеры Содерберга, оснащенные стандартным газосборным колоколом и горелочными устройствами, не отвечают современным требованиям по эффективности укрытия. Для достижения нормативных экологических требований необходима модернизация существующей технологии. Внедрение технологии экологичного Содерберга, оснащенного модернизированным газосборным колоколом и принципиально новой четырехкупольной системой газоудаления, обеспечивает среднесуточную эффективность укрытия 97,4 %.

*Ключевые слова:* электролиз алюминия, электролизер с самообжигающимся анодом с верхним токоподводом, экологичный Содерберг, КПД укрытия, система газоудаления, газосборный колокол.

**Виноградов А.М.** – канд. техн. наук, руководитель направления «Химия и экология» НТЦ ОАО «Красцветмет» (660027, г. Красноярск, Транспортный проезд, 1). Тел.: (391) 259-33-33 (доб. 3226). E-mail: [a.vinogradov@krastsvetmet.ru](mailto:a.vinogradov@krastsvetmet.ru).

**Пинаев А.А.** – директор проекта «Перевод алюминиевых заводов ОК РУСАЛ на экологически приемлемую технологию Содерберга», ООО «РУСАЛ ИТЦ». E-mail: [Andrey.Pinaev@rusal.com](mailto:Andrey.Pinaev@rusal.com).

**Виноградов Д.А.** – рук-ль проекта, ООО «РУСАЛ ИТЦ». E-mail: [Dmitriy.Vinogradov@rusal.com](mailto:Dmitriy.Vinogradov@rusal.com).

**Пузин А.В.** – менеджер группы управления проектами КрАЗ, ООО «РУСАЛ ИТЦ». E-mail: [Anatoliy.Puzin@rusal.com](mailto:Anatoliy.Puzin@rusal.com).

**Шадрин В.Г.** – канд. техн. наук, менеджер отдела матмоделирования и измерений, ООО «РУСАЛ ИТЦ». E-mail: [Valeriy.Shadrin@rusal.com](mailto:Valeriy.Shadrin@rusal.com).

**Зорько Н.В.** – канд. техн. наук, начальник отдела экоаналитических измерений, подразделение ООО «РУСАЛ ИТЦ» в Санкт-Петербурге. E-mail: [Nataliya.Zorko@rusal.com](mailto:Nataliya.Zorko@rusal.com).

**Сомов В.В.** – менеджер отдела природоохранных технологий, ООО «РУСАЛ ИТЦ». E-mail: [Vladimir.Somov@rusal.com](mailto:Vladimir.Somov@rusal.com).

*Для цитирования:* Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В., Сомов В.В. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 1. С. 19–30. DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30).

*Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., Somov V.V.*  
**Increasing hooding efficiency of Soderberg cells**

The Soderberg aluminum reduction technology is associated with high pollutant emissions including gaseous and poorly soluble fluorides. Currently, conventional VSS cells equipped with a standard gas skirt and a burner do not meet the modern hooding efficiency requirements. The existing technology must be upgraded in order to comply with environmental regulations. The environmentally friendly Soderberg technology implemented with an upgraded gas skirt and a fundamentally new 4-dome gas removal system ensures daily average hooding efficiency of 97,4 %.

*Keywords:* aluminium reduction, VSS cell, environmentally friendly Soderberg, hooding efficiency, gas removal system, gas skirt.

**Vinogradov A.M.** – Cand. Sci. (Tech.), head of direction, Research & Development, JSC Krastsvetmet (660027, Russia, Krasnoyarsk, Transportniy str., 1). Tel.: +7 (391) 259-33-33 (ext. 3226). E-mail: [a.vinogradov@krastsvetmet.ru](mailto:a.vinogradov@krastsvetmet.ru).

**Pinaev A.A.** – project director, Adoption EcoSoderberg Technology on Aluminium Smelters of UC RUSAL, LLC RUSAL ETC. E-mail: [Andrey.Pinaev@rusal.com](mailto:Andrey.Pinaev@rusal.com).

**Vinogradov D.A.** – project leader, LLC RUSAL ETC. E-mail: [Dmitriy.Vinogradov@rusal.com](mailto:Dmitriy.Vinogradov@rusal.com).

**Puzin A.V.** – manager, Project Management Group of Krasnoyarsk Aluminium Plant, LLC RUSAL ETC. E-mail: [Anatoliy.Puzin@rusal.com](mailto:Anatoliy.Puzin@rusal.com).

**Shadrin V.G.** – Cand. Sci. (Tech.), manager, Division of mathematic simulation and measurements, LLC RUSAL ETC. E-mail: [Valeriy.Shadrin@rusal.com](mailto:Valeriy.Shadrin@rusal.com).

**Zorko N.V.** – Cand. Sci. (Tech.), head of the Division of environmental measurements, LLC RUSAL ETC.

E-mail: Nataliya.Zorko@rusal.com.

**Somov V.V.** – manager, Division of environmental technology, LLC RUSAL ETC. E-mail: Vladimir.Somov@rusal.com.

**Citation:** Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzhin A.V., Shadrin V.G., Zorko N.V., Somov V.V. Povyshenie effektivnosti ukrytiya elektrolizerov Soderberga. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 1. P. 19–30.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30.

## Введение

Для Красноярского алюминиевого завода (КрАЗ) можно выделить по крайней мере три основных фактора, которые в совокупности обуславливают высокий приоритет решения задач по улучшению его экологических показателей. Во-первых, КрАЗ является вторым по величине заводом в мире, производительность которого к настоящему времени достигла ~1 млн т Al/год. Во-вторых, 88 % алюминия-сырца производится с использованием наиболее опасной в экологическом отношении технологии электролиза — на электролизерах с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом. И в-третьих, завод-гигант расположен в непосредственной близости от города Красноярск с миллионным населением, определяя повышенный фон общественного интереса к проводимой предприятием экологической политике. При этом следует отметить, что обеспечение экологической безопасности жизни населения в наибольшей степени зависит от уровня загрязнения атмосферного воздуха. Таким образом, разработка и претворение в жизнь природоохранных мероприятий являются ключевым направлением модернизации КрАЗ, особенно в области охраны атмосферного воздуха.

Наиболее опасными выбросами алюминиевого производства, с точки зрения оказываемого влияния на атмосферу, являются бенз(а)пирен (класс опасности 1), газообразные и плохо растворимые фториды (кл. оп. 2). Также следует отметить менее опасные, но выделяющиеся в больших объемах пыль неорганическую с содержанием до 20 % SiO<sub>2</sub> (кл. оп. 3), диоксид серы (кл. оп. 3) и оксид углерода (кл. оп. 4).

В электролизном производстве выделяют два источника загрязнения атмосферного воздуха: дымовые трубы газоочистных установок и аэрационные фонари электролизных корпусов. Выбросы последних вносят максимальный вклад в загрязнение атмосферного воздуха в силу следующих причин:

— аэрационные фонари пропускают основной объем наиболее опасных загрязняющих веществ — например, удельные выбросы фтористого водоро-

да через них примерно в 20 раз выше, чем через дымовые трубы [1];

— аэрационные фонари не оборудованы каким-либо газоочистным оборудованием, и количество выбросов через аэрационный фонарь отдельно взятого корпуса электролиза является функцией состояния технологии, организации труда, культуры производства и КПД укрытия электролизеров [2];

— аэрационный фонарь, при прочих равных условиях, обуславливает более высокие приземные концентрации загрязняющих веществ, являясь линейным источником средней высоты (высота ~26 м, длина ~600 м), по сравнению с дымовой трубой — точечным высоким источником (высота 80 м).

Объем загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу через дымовые трубы, в настоящее время достиг нормативных значений, поскольку электролизные корпуса КрАЗ в 2000—2008 гг. были оснащены современными газоочистными установками, включающими сухой абсорбционный блок и мокрый хвост, и дальнейшая модернизация в данном направлении пока не требуется.

Все вышеперечисленное свидетельствует о том, что наиболее приоритетным и действенным, по величине оказываемого эффекта, направлением уменьшения вредного воздействия электролизного производства на окружающую среду является снижение фонарных выбросов.

Цель данной работы заключалась в сокращении выбросов через аэрационный фонарь за счет увеличения КПД укрытия электролизеров до 96 % и более.

## Модернизация электролизеров с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом Красноярского алюминиевого завода

Электролизеры С-8БМ, оборудованные типовым газосборным колоколом и щелевыми горелками, характеризуются сравнительно низким КПД

Таблица 1  
**Рекомендуемые значения эффективности улавливания фторидов и анодных газов газосборным колоколом для электролизеров с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом [3]**

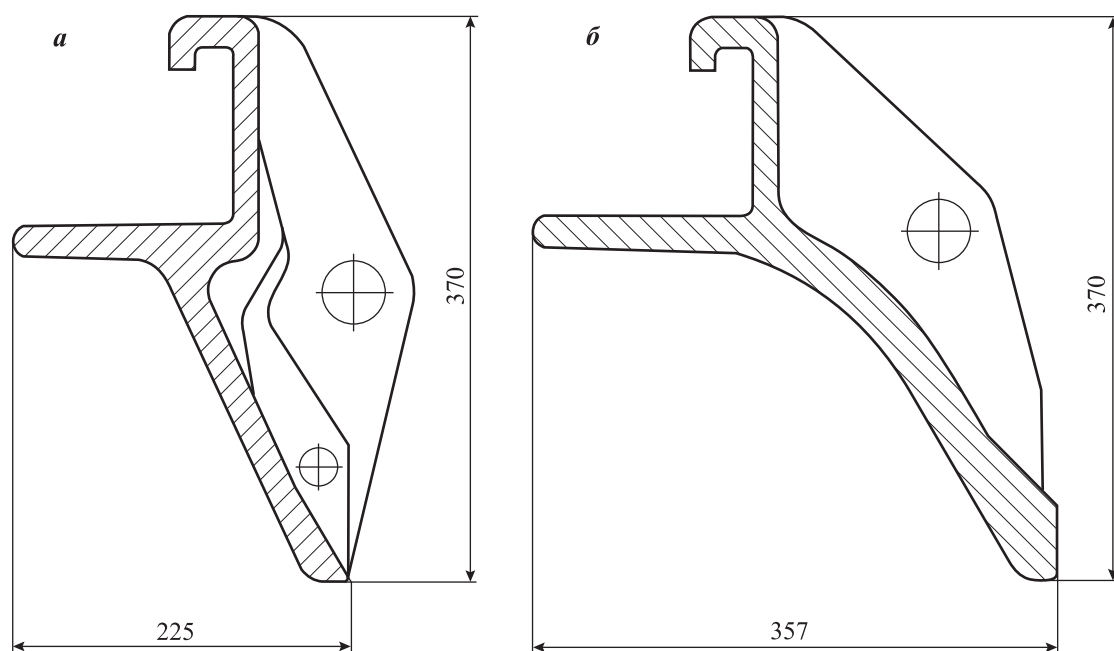
Состояние электролизеров	Эффективность улавливания, доли ед.
Регламентированная обработка	0,35
Анодный эффект и его ликвидация	0,35
Выливка металла, технологические замеры	0,60
Технологическая обработка	0,35
Работа с неисправным и ремонтируемым газосборником	0,60
Утечки газа через неплотности («дымки»)	0,43
Обвалы корки («огоньки»)	0,43
Ремонт пояса подвески колокола	0,10
Простой системы газоотсоса	0,00
Работа с герметичным газосборником (укрытием)	0,92

укрытия. Рекомендации по эффективности улавливания фторидов газосборным колоколом для электролизеров с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом в различных состояниях

приведены в табл. 1 [3]. Существующий для электролизеров С-8БМ уровень КПД укрытия недостаточен для удовлетворения современным экологическим требованиям, поэтому в рамках проекта по созданию технологии экологичного Содерберга [4], получившего аббревиатуру С-8БМ(Э), ставилась задача по увеличению КПД укрытия до  $\geq 96\%$ . Задача была решена за счет комплексного совершенствования газосборного колокола (ГСК) и системы газоудаления (СГУ).

### Совершенствование газосборного колокола

Конструкция газосборного колокола, изначально разработанная для электролизеров С-2, С-3, работающих на силе тока 130 кА, в настоящее время без особых изменений эксплуатируется на электролизерах С-8БМ с силой тока 170–175 кА. При одинаковой площади поперечного сечения подколокольного пространства для С-2, С-3 и С-8БМ объем образующихся анодных газов на электролизерах С-8БМ больше, в результате чего выше скорость движения газов под колоколом (в 1,5 раза) и аэродинамическое сопротивление (более чем в 2 раза) [5, 6]. В процессе эксплуатации это обуславливает более интенсивное забивание подколокольного пространства электролитом, глиноземом и угольной пеной, особенно в районе расположения бункеров автоматической подачи глинозема (АПГ) и выливных секций. При образовании от-



**Рис. 1.** Сечение секции газосборного колокола

*a* – С-8БМ, трапецидальная форма; *б* – С-8БМ(Э), параболическая форма

Таблица 2

**Сравнительные характеристики параметров газосборного колокола**

Параметр	Единица измерения	Тип электролизера		
		С-2, С-3	С-8, С-8БМ	С-8БМ(Э)
Общий объем образующихся анодных газов	н.м <sup>3</sup> /ч	30,0	42,0	42,0
Объем анодных газов, поступающих в подколокольное пространство по одной продольной стороне	н.м <sup>3</sup> /ч	15,0	21,0	21,0
	н.м <sup>3</sup> /с	0,0041	0,0058	0,0058
Площадь поперечного сечения подколокольного пространства	м <sup>2</sup>	0,05	0,05	0,125
Скорость движения газов в подколокольном пространстве	м/с	0,09	0,2	0,08
Число Рейнольдса	–	80,0	160,0	80,0
Коэффициент трения ( $\lambda$ )	–	0,73	0,37	0,85
Потери давления	Н/м <sup>2</sup>	0,05	0,12	0,05

ложений происходит выбивание анодных газов из-под колокола, приводя к росту фонарных выбросов и ухудшению санитарных условий в рабочей зоне.

Совершенствование конструкции ГСК на электролизерах С-8БМ(Э) заключалось в повышении пропускной способности и улучшении аэродинамических характеристик подколокольного пространства. Для этого была увеличена площадь поперечного сечения газоходного канала и изменена конфигурация секций ГСК с трапециевидальной на параболическую (рис. 1) [6, 7]. Параболическая форма канала близка к оптимальной круглой, в которой отсутствуют застойные зоны и вероятность образования отложений значительно ниже. Результат реализованных технических решений — увеличение площади поперечного сечения газоходного канала в 2,5 раза, уменьшение скорости движения газов в подколокольном пространстве и его аэродинамического сопротивления более чем в 2 раза. При этом аэродинамические характеристики подколокольного пространства электролизера С-8БМ(Э) сопоставимы с таковыми для С-2 и С-3, для которых ГСК рядовой конструкции создавался изначально (см. табл. 2) [5].

**Совершенствование системы газоудаления**

Само по себе изменение конструкции ГСК малоэффективно с точки зрения увеличения КПД укрытия, так как из-за конструктивных особенностей горелочных устройств в подколокольном пространстве образуется избыточное, до 150 Па [8], давление (разрежение наблюдается только в непосредственной близости от горелки), под действием которого газы выбиваются через суще-

ствующие неплотности в ГСК и обвалы. Поэтому совместно с модернизацией ГСК была необходима принципиально новая система газоудаления электролизера, обеспечивающая создание в подколокольном пространстве небольшого разрежения, за счет чего резко сокращалось выбивание газов и пламени через существующие неплотности, даже в условиях образования отложений в подколокольном пространстве. Конструкция и режим работы дымососов при этом оставались на прежнем уровне.

Задача увеличения КПД укрытия электролизеров Содерберга решена путем замены горелочных устройств щелевого типа [8] на четырехкупольные системы газоудаления (рис. 2).

Система газоудаления [9, 10] состоит из 4 куполов, расположенных по периметру ГСК: 2 купола находятся по углам и 2 — по продольным сторонам электролизера между бункерами АПГ. Купола соединены между собой трубопроводами, по которым газы поступают в систему организованного отсоса. Наличие 4 куполов, их расположение и применение трубопроводов от центра и углов разного диаметра с соотношением 2 : 3 обеспечивают равномерный отвод газов из-под колокола. В центральных куполах выполнено по два отверстия диаметром 35 мм для подсоса воздуха, необходимого для догорания анодных газов. Кроме того, под колоколом происходит горение анодных газов с воздухом, который за счет создаваемого здесь разрежения поступает внутрь через неплотности ГСК и сквозь криолитоглиноземную засыпку (неорганизованный присос). Для автоматической очистки трубопроводов СГУ от отложений

используется продувка, подсоединенная к клапану сброса воздуха системы АПГ. На угловых и центральных секциях ГСК и трубопроводах СГУ предусмотрены лючки для выполнения технологических операций и чистки.

Через специальные отверстия в секциях ГСК (диаметр отверстий 20 мм) были выполнены замеры, подтвердившие наличие небольшого разрежения в подколокольном пространстве электролизеров С-8БМ(Э), оснащенных четырехкупольной системой газоудаления (см. рис. 3). Замеры выполнялись дифманометром ДМЦ-01М в комплекте с напорной трубкой НИИОГАЗ [11]. Среднее разрежение под ГСК составило от 5 до 15 Па, но для ванн, расположенных ближе к дымососу, оно может достигать 30 Па.

Весь цикл создания СГУ электролизера С-8БМ(Э) от идеи до тиражирования на завод состоял из следующих основных этапов:

**1. Математическое моделирование СГУ.** Математическое моделирование проводилось в трехмерной стационарной постановке с использованием программных комплексов «Star CCM+» и «Fluent», при этом принимались следующие исходные данные и условия:

- эскизные проекты купольных СГУ и ГСК;
- расчетная сетка геометрии СГУ состоит из 300000 ячеек (см. рис. 4);
- объем удаляемых газов от электролизера равен  $650 \text{ н.м}^3/\text{ч}$  (с учетом присосов);
- площадь неорганизованного подсоса воздуха в подколокольное пространство через ГСК не

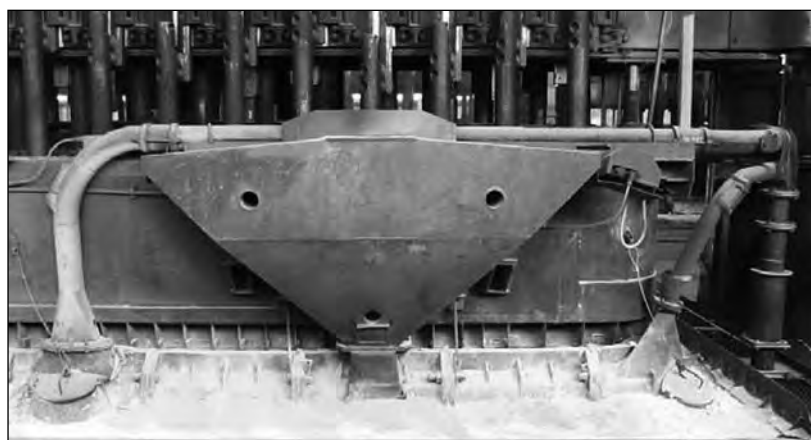


Рис. 2. Электролизер С-8БМ(Э), оборудованный четырехкупольной СГУ

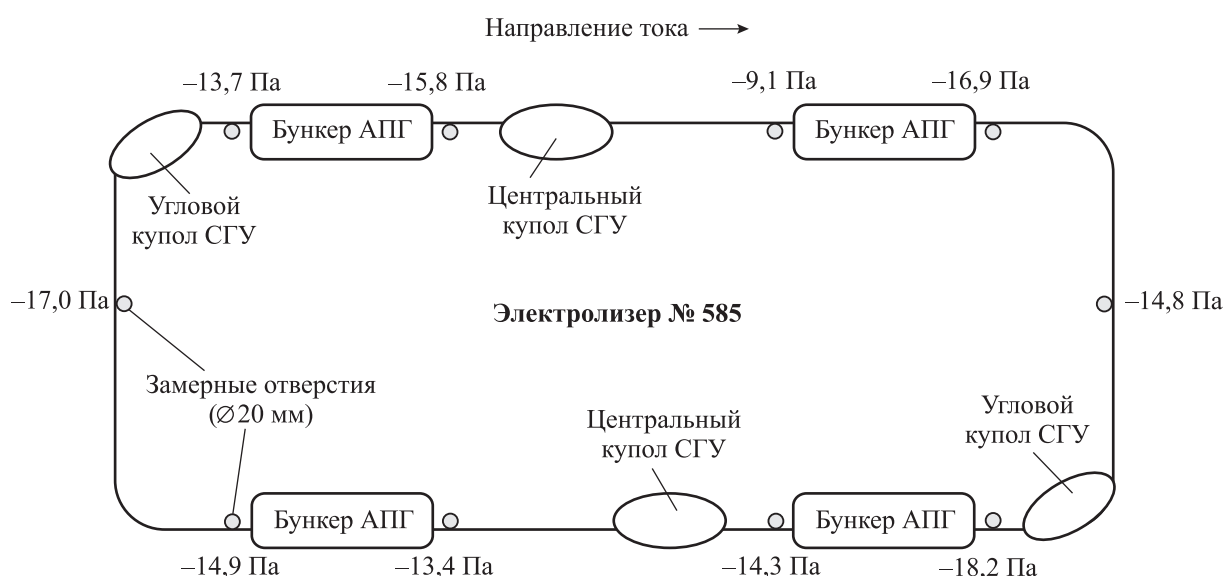


Рис. 3. Значения разрежения в подколокольном пространстве электролизера № 585

Таблица 3  
Граничные условия математической модели СГУ

Область	Описание граничного условия	Принятые значения	Тип граничного условия в «Star CCM+»
Область подачи анодного газа	Массовый расход газовой смеси с постоянной температурой	$G_{\text{gas}} = 0,01722 \text{ кг/с}$ $T_{\text{gas}} = 1100 \text{ К}$	Mass flow inlet
Отверстия для подсоса воздуха	Атмосферное давление, температура 300 К	$P = 0 \text{ Па}$ $T = 300 \text{ К}$	Pressure outlet
Выходы	Массовый расход газовой смеси	$G = 0,2 \text{ кг/с}$	Mass flow outlet
Внутренняя стенка со стороны анода	Стенка с постоянной температурой	$T = 773 \text{ К}$	Wall
Внешние стенки укрытия	Стенка с теплоотдачей	$\alpha = 10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$	Wall

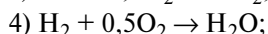
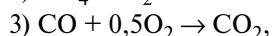
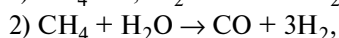
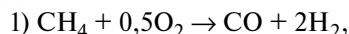
превышает 5000 мм<sup>2</sup>, т.е. не более 250 мм<sup>2</sup> в районе одной секции ГСК;

— анодный газ моделируется как неизотермический несжимаемый многокомпонентный газ;

— состав анодных газов на входе в пространство под ГСК, %: 76 CO<sub>2</sub>, 22 CO, 1,4 N<sub>2</sub>, 0,4 H<sub>2</sub>, 0,2 CH<sub>4</sub>;

— во всех вариантах расчета расход анодного газа равен 0,01722 кг/с;

— горение анодного газа в модели представлено 4-стадийным механизмом:



— в расчетах используется модель горения Eddy-dissipation/Eddy-break-up, которая предполагает, что скорости реакций контролируются турбулентностью потока газа.

Граничные условия представлены на рис. 4 и в табл. 3. На анодной стенке задавалась постоянная температура, на внешней стенке — теплоотдача. Анодный газ в модели вводился через узкие щели вдоль продольных и торцевых сторон анода. Дополнительно подавался воздух по периметру ГСК, имитирующий неорганизованные присосы. На выходе моделируется фиксированное разрежение либо фиксированный расход. Входные окна для организованных присосов воздуха располагались на стенках ГСК (10 отверстий диаметром 20 мм) и на боковых поверхностях центральных куполов (по 2 отверстия на каждом куполе диаметром 35 мм).

Результаты математического моделирования показали, что температура газов в центральных куполах СГУ достигает 800 °С (рис. 5), что достаточно для дожигания анодных газов, при этом в



Рис. 4. Геометрия расчетной области

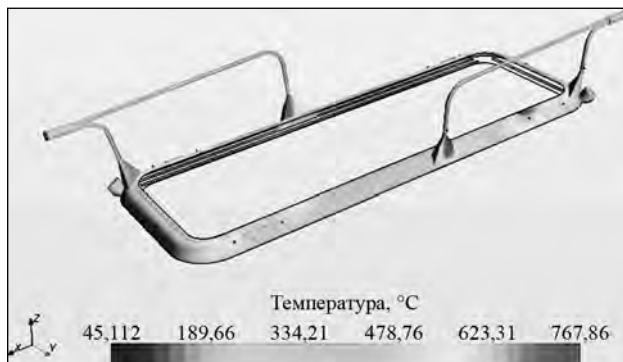


Рис. 5. Температурное поле в системе удаления газов

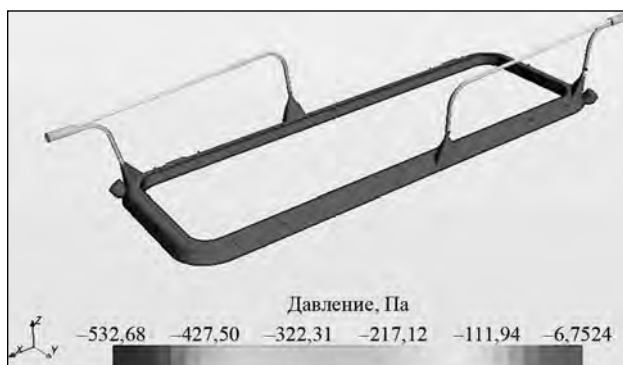


Рис. 6. Поле давления в системе удаления газов

Таблица 4  
Сопоставление расчетных и экспериментальных параметров СГУ [12]

Параметр	Расчет	Эксперимент
Разрежение в подколольном пространстве, Па	6	4,8
Массовый расход на выходе, кг/с	0,155	0,233
Объемный расход на выходе, н.м <sup>3</sup> /ч	430	649
Средняя объемная доля газа на выходе:		
CO	0,025	0,0045
O <sub>2</sub>	0,124	0,169
N <sub>2</sub>	0,718	0,773
CO <sub>2</sub>	0,146	0,053
Средняя температура на выходе, °С	216	246

подколольном пространстве поддерживается разрежение 10–20 Па (рис. 6), что исключает выбивание газов в корпус.

**2. Выполнение натуральных испытаний опытных СГУ. Идентификация математической модели.** По результатам математического моделирования выбрана конструкция СГУ, при использовании которой отвод газов осуществляется от 4 точек, расположенных по периметру ГСК: 2 точки находятся по углам, еще 2 — по продольным сторонам электролизера. Опытными стальными 4-купольными СГУ была полностью оснащена бригада из 20 электролизеров, связанных между собой общим подкорпусным газоходным трактом.

За время эксплуатации опытных СГУ проведены натурные испытания параметров их работы. В рамках испытаний выполнены замеры температуры и скорости отходящих газов, разрежения, концентрации газовых компонент: CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO, CH<sub>4</sub>. Измерения осуществляли в пространстве под газосборным колоколом, в куполах и трубопроводах СГУ, спусках электролизеров. На основе полученных экспериментальных данных выполнена идентификация математической модели 4-купольной СГУ (табл. 4).

По результатам идентификации модели установлено, что для корректного задания граничных условий необходимо учитывать:

- неорганизованные присосы воздуха в газоходы СГУ;
- неорганизованные присосы воздуха под ГСК;

— неравномерность выхода анодного газа вдоль периметра анода;

— наличие пылевых отложений на внутренних стенках трубопроводов СГУ;

— фиксированное разрежение на выходе.

**3. Предварительная экологическая оценка. Доработка конструкции СГУ.** Параллельно с проведением натуральных испытаний была выполнена в масштабах бригады предварительная экологическая оценка КПД укрытия электролизеров С-8БМ(Э), оснащенных опытными СГУ. Методика оценки приведена ниже. Суточное средневзвешенное КПД укрытия составило 95,4 %, что несколько ниже целевых 96 %. Однако на этапах испытания и эксплуатации опытных СГУ были выработаны технические решения по совершенствованию их конструкций, реализация которых давала предпосылки дальнейшего повышения КПД укрытия.

В конструкцию СГУ были внесены изменения, направленные на повышение равномерности газораспределения между точками газоотсоса, снижение газодинамического сопротивления системы, улучшение догорания отходящих анодных газов, уменьшение накопления пылевых отложений и увеличение срока службы. Принятые изменения подтверждены положительными результатами испытаний на математической модели. Окончательная конструкция четырехкупольной СГУ представлена на рис. 2. Модернизированными СГУ была полностью переоснащена бригада из 20 электролизеров (рис. 7).

**4. Комплексная экологическая оценка бригады электролизеров С-8БМ(Э).** Комплексная экологическая оценка явилась наиболее важным этапом реализации проекта, так как ее результаты должны были дать окончательный ответ об экологической эффективности электролизеров С-8БМ(Э), оснащенных 4-купольными СГУ, и обоснованности их дальнейшего тиражирования.

Экологическая оценка включила в себя одновременные замеры загрязняющих веществ, поступающих от бригады электролизеров в организованный газоотсос и аэрационный фонарь корпуса, а также попадающих в корпус через приточную вентиляцию. Определялись концентрации фтористого водорода, твердых фторидов, диоксида серы, пыли, оксида углерода, смолистых веществ, бенз(а)пирена. Измерение содержания загрязняющих веществ осуществлялось таким образом, чтобы охватить все основные технологические операции, проводимые в корпусе электролиза, а также меж-



Рис. 7. Бригада электролизеров С-8БМ(Э)

операционный период. Ниже рассмотрены результаты, полученные для фтористого водорода и твердых фторидов как маркерных веществ электролизного производства, уровень выбросов которых характеризует эффективность укрытия.

**Методика выполнения комплексной экологической оценки.** Для инструментальных замеров выбросов фтористого водорода и твердых фторидов использовались следующие аттестованные методики [13]:

- МВИ № ПрВ 2000/3 «Методика выполнения измерений массовой концентрации твердых фторидов в промышленных выбросах (потенциометрический метод)» — основана на улавливании пыли, содержащей фториды, фильтровальным патроном с фильтром из фторопластовой стружки, последующей щелочной обработке отобранной пробы и отгонке фторидов с паром в виде летучей кремнефтористоводородной кислоты с дальнейшим потенциометрическим определением уловленного иона фтора с применением фторидселективного электрода;

- МВИ № ПрВ 2000/7 «Методика выполнения измерений массовой концентрации фтористого водорода в промышленных выбросах организованного отсоса (фотометрический метод)» — включает фазовое разделение фтористых соединений при пропускании пробы газа через фильтровальный патрон с фильтром из фторопластовой стружки, последующую абсорбцию фтористого водорода дистиллированной водой в поглотителях Рихтера и дальнейшее его фотометрическое определение по реакции образования тройного комплексного соединения синего цвета с ализаринкомплексонатом лантана. Интенсивность окраски комплекс-

ного соединения пропорциональна концентрации фторид-ионов в растворе. Количество газов организованного отсоса определяется по ГОСТ 17.2.4.06-90 «Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения»;

- МВИ № ФГ 2004/2 «Методика выполнения измерений массовой концентрации фтористого водорода в воздухе, удаляемом общеобменной вентиляцией из корпусов электролиза алюминиевых заводов (фонарных газах) (потенциометрический метод)» — основана на фазовом разделении фтористых соединений при пропускании пробы газа через фильтровальный патрон с фильтром из фторопластовой стружки, последующей абсорбции фтористого водорода дистиллированной водой в поглотителях Рихтера и потенциометрическом определении уловленного иона фтора с использованием фторидселективного электрода;

- МВИ № ФГ 2004/3 «Методика выполнения измерений массовой концентрации пыли и твердых фторидов в воздухе, удаляемом общеобменной вентиляцией из корпусов электролиза алюминиевых заводов (фонарных газах) (потенциометрический метод)». Массовая концентрация пыли в фонарных газах оценивается методом внешней фильтрации путем отбора пробы с использованием фильтра АФА. Для расчета массовой концентрации твердых фторидов проводили щелочную обработку отобранной пробы пыли, отгонку (для отделения мешающих примесей) фторидов с паром в виде летучей кремнефтористоводородной кислоты и дальнейшее потенциометрическое определение уловленного иона фтора с использованием фторидселективного электрода;



• МВИ № ОЭ-ФГ 2004/4 «Методика выполнения измерений количества воздуха, удаляемого общеобменной вентиляцией электролизных корпусов алюминиевых заводов (фонарных газов)» — проводится измерение скорости фонарных газов в горловине с помощью автоматического крыльчатого анемометра «Testo 400», при этом фиксируются температура фонарных газов на исследуемом участке, атмосферное давление, направление и скорость ветра.

При проведении измерений были выбраны участки аэрационного фонаря над бригадой электролизеров корпуса № 5 ОАО «РУСАЛ Красноярск», состоящей из 20 электролизеров С-8БМ(Э), оснащенных 4-купольными СГУ. Горловину обследуемой секции аэрационного фонаря условно разбили на 4 «замерных участка» — по 2 с каждой стороны аэрационного фонаря. Отбор проб осуществляли одновременно в геометрическом центре каждого замерного участка в горловине аэрационного фонаря электролизного корпуса.

Объем фонарных газов определяли как произведение площади свободного сечения (за вычетом балок, ферм и других конструкций, перекрывающих сечение) измеряемого участка горловины аэрационного фонаря и средней скорости газов в аэрационном фонаре измеряемых участков.

Схема размещения замерных точек представлена на рис. 8. Точки 1–4, расположенные на аэрационном фонаре корпуса (на уровне высоты 23 м), предназначены для измерения загрязняющих веществ в фонарных газах. Точка 5, находящаяся непосредственно в бригаде электролизеров (на высоте 4 м), — это точка наблюдения и хронометража за технологическим состоянием электролизеров № 501–510, 577–586. Точка 6 предназначалась для

замера загрязняющих веществ организованного газоотсоса и располагалась на сборном газоходе от бригады исследуемых электролизеров. Замерные точки 7 и 8 использовались для определения загрязняющих веществ, поступающих в корпус через приточную вентиляцию, и находились вдоль продольных сторон бригады электролизеров (на уровне земли).

Кроме того, для уточнения вклада каждой отдельной операции в фонарные выбросы были проведены замеры загрязняющих веществ, поступающих в организованный отсос от отдельных электролизеров. Измерения проводились при технологической обработке, выливке металла, технологических замерах, обвалах, различных степенях разгерметизации и анодном эффекте. Для этого газоходные спуски электролизеров были оснащены питометражными лючками. Полученные результаты служили основой при уточнении коэффициентов эффективности улавливания ГСК для различных состояний электролизера С-8БМ(Э).

**Результаты комплексной экологической оценки.** КПД укрытия электролизеров является тем параметром, анализ которого позволяет сделать выводы об эффективности модернизированных газосборного колокола и системы газоудаления с санитарно-технической точки зрения и который в значительной степени определяет уровень выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при существующей технологии.

В данной работе эффективность укрытия бригады электролизеров С-8БМ(Э) оценивалась фторидным методом, при этом параллельно проводился хронометраж всех выполняемых на электролизерах операций и их состояний.

Фторидный метод основан на инструменталь-

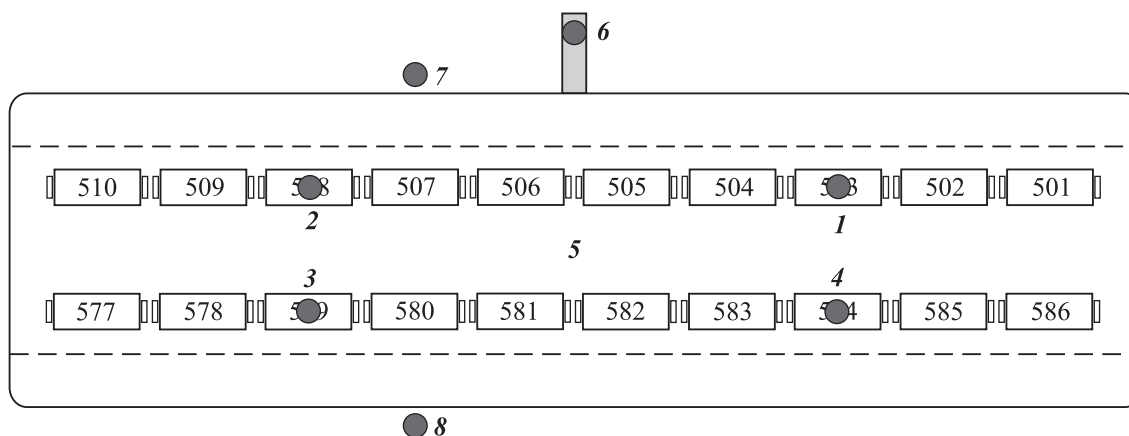


Рис. 8. Схема расположения в бригаде точек для измерения

Таблица 5  
**Рекомендуемые значения эффективности улавливания фторидов газосборным колоколом для электролизеров С-8БМ(Э)**

Состояние электролизеров	Эффективность улавливания С-8БМ(Э), доли ед.
Анодный эффект и его ликвидация	0,973
Выливка металла, технологические замеры	0,973
Технологическая обработка	0,816
Работа с неисправным и ремонтируемым газосборником	0,80
Утечки газа через неплотности («дымки»)	0,848
Обвалы корки («огоньки»)	0,848
Ремонт пояса подвески колокола	0,10
Простой системы газоотсоса	0,00
Работа с герметичным газосборником (укрытием)	0,993

ном определении количества фторидов ( $F_{\text{общ}} = F_{\text{ТВ}} + F_{\text{газ}}$ ) — как удаляемых системой газоотсоса ( $g_o^F$ ), так и поступающих (помимо системы газоотсоса) в аэрационные фонари ( $g_{\text{ф}}^F$ ). Эффективность укрытий электролизеров ( $\eta_y$ ) рассчитывается как отношение количества фторидов, поступающих в систему газоотсоса, к общему количеству фторидов, выделяющихся от электролизеров:

$$\eta_y = \frac{g_o^F}{g_o^F + g_{\text{ф}}^F}.$$

Исходя из полученных по результатам инструментальных замеров величин ( $g_o^F$ ) и ( $g_{\text{ф}}^F$ ) эффективность укрытия электролизеров С-8БМ(Э) при межоперационном режиме, который является основным состоянием электролизера, составила 99,3 %, а суточное средневзвешенное КПД укрытия с учетом всех проводимых технологических операций — 97,4 %. Таким образом, была подтверждена экологическая эффективность технологии С-8БМ(Э) по улавливанию фторидов газосборным колоколом.

Следует отметить, что модернизированные ГСК и СГУ не оказывают влияние на выбросы загрязняющих веществ, выделяющихся с поверхности самообжигающихся анодов, а также при выполнении операций по обслуживанию анодного узла — таких, как перестановка штырей, прорезка и подпрессовка анодной массы, перетяжка анодной

рамы (бенз(а)пирен, смолистые вещества и др.). Сокращение выбросов с анодной поверхности возможно за счет внедрения сухой и коллоидной анодной массы [14], применения альтернативного связующего, создания анодного укрытия и др. Результаты данных работ здесь не приводятся.

На основании замеров выбросов загрязняющих веществ от отдельных электролизеров были уточнены рекомендуемые значения эффективности укрытия электролизеров С-8БМ(Э) при их различных технологических состояниях (табл. 5). Полученные данные необходимы для определения эффективности системы газоотсоса путем осуществления хронометража технологических операций [15] в корпусах, оснащенных электролизерами С-8БМ(Э).

Данные по эффективности улавливания фторидов ГСК для электролизеров С-8БМ(Э) были внесены в «Расчетную инструкцию (методику) по определению состава и количества вредных (загрязняющих) веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух при электролитическом производстве алюминия, для электролизеров типа С-8БМ(Э)». Эта инструкция включена в «Перечень методик, используемых в 2014 г., для расчета, нормирования и контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух».

**5. Внедрение модернизированных СГУ в корпусах электролиза ОАО «РУСАЛ Красноярск».** На основании положительных результатов комплексной экологической оценки электролизеров С-8БМ(Э) было принято решение о переводе Красноярского алюминиевого завода на технологию экологического Содерберга. Перевод на новую технологию проходил в два этапа. С 2010 по 2015 г. на электролизеры С-8БМ(Э) были полностью переведены корпуса № 3—6. С 2015 г., по мере выхода электролизеров С-8БМ в капитальный ремонт, к переходу на экологичную технологию С-8БМ(Э) присоединяются остальные корпуса завода.

## Заключение

Оснащение электролизеров Содерберга модернизированными газосборным колоколом и купольной системой газоудаления, работающей на принципе создания в подколокольном пространстве разрежения, позволило увеличить среднесуточную эффективность укрытия до 97,4 %; при герметизированном состоянии электролизеров эффективность укрытия достигает 99,3 %.

Переход на экологические электролизеры С-8БМ(Э), характеризующиеся высокими значениями КПД укрытия, в совокупности с достижением высокой организации труда и культуры производства, позволит Красноярскому алюминиевому заводу значительно сократить выбросы загрязняющих веществ через аэрационные фонари корпусов электролиза с достижением нормативных требований по выбросам газообразных и плохо растворимых фторидов.

## Литература

1. Бузунов В.Ю., Куликов Б.П. Технические аспекты экологической безопасности алюминиевого производства // Техн.-экон. вестн. «Русского алюминия». 2005. No. 11. С. 5—14.
2. Holt N.J., Aalbu M.S., Bolstad K.L., Foosnæs T., Karlsen M., Kielland V., Kvande H. Environmental improvements in a Soderberg potline // *Light Metals*. 2000. P. 339—344.
3. Приказ Ростехнадзора от 31.03.2005 No. 182 (ред. от 29.11.2005). URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 10.07.2013).
4. Buzunov V., Mann V., Chuchuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter // *Light Metals*. 2013. P. 573—576.
5. Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Ребрик И.И. Совершенствование систем колокольного газоотсоса на мощных электролизерах Содерберга. Красноярск: ИПК СФУ, 2010.
6. Шахрай С.Г., Сугак Е.В. Проблемы очистки газовых выбросов алюминиевых заводов и пути их решения // Техн.-экон. вестн. «Русского алюминия». 2006. No. 14. С. 38—42.
7. Шахрай С.Г., Куликов Б.П., Петров А.М., Сугак Е.В., Кучкин А.Г., Фризоргер В.К. Газосборное устройство алюминиевого электролизера (варианты): Пат. 2324012 (РФ). 2006.
8. Куликов Б.П., Сторожев Ю.И. Пылегазовые выбросы алюминиевых электролизеров с самообжигающимися анодами. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012.
9. Архипов Г.В., Манн В.Х., Пингин В.В., Фризоргер В.К., Третьяков Я.А., Архипов А.Г., Шадрин В.Г. Устройство для сбора и удаления газов из алюминиевого электролизера Содерберга: Пат. 2443804 (РФ). 2010.
10. Фризоргер В.К., Шадрин В.Г., Пузин А.В., Виноградов А.М., Аникин В.В., Моренко А.В., Грибков К.А. Совершенствование системы удаления газов на электролизерах экологического Содерберга // Сб. науч. статей XVIII

Междунар. конф. «Алюминий Сибири» (г. Красноярск, 5—7 сент. 2012 г.). Красноярск: Версо, 2012. С. 408-415.

11. ГОСТ 17.2.4.07-90. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения.
12. Виноградов А.М., Дектерев А.А., Необъявляющий П.А., Дектерев Ар.А., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Грибков К.А. Оптимизация купольной системы удаления газов от электролизера С-8БМЭ // Сб. науч. статей XIX Междунар. конф. «Алюминий Сибири» (г. Красноярск, 3—6 сент. 2013 г.). Красноярск: Версо, 2013. С. 835—845.
13. Перечень методик измерений концентраций загрязняющих веществ в выбросах промышленных предприятий, допущенных к применению в 2015 году. URL: [http://www.nii-atmosphere.ru/PUBL/per\\_method\\_2015.pdf](http://www.nii-atmosphere.ru/PUBL/per_method_2015.pdf) (дата обращения: 16.03.2016).
14. Frizorger V., Mann V., Chuchuk E., Buzunov V., Marakushina E., Pitercev N., Cherskikh I., Gildebrandt E. Vertical stud Soderberg technology development by UC RUSAL in 2004—2010. Part 2. EcoSoderberg technology // *Light Metals*. 2012. P. 749—753.
15. Буркат В.С., Друкарев В.А., Фукс А.М. Определение эффективности систем организованного газоотсоса в корпусах электролиза // Цвет. металлы. 1996. No. 7. С. 28—30.

## References

1. Buzunov V.Yu., Kulikov B.P. Tekhnicheskie aspekty ekologicheskoi bezopasnosti alyuminievogo proizvodstva [Technical aspects of the environmental safety of aluminum production]. *Tekhniko-ekonomicheskii vestnik «Russkogo alyuminiya»*. 2005. No. 11. P. 5—14.
2. Holt N.J., Aalbu M.S., Bolstad K.L., Foosnæs T., Karlsen M., Kielland V., Kvande H. Environmental improvements in a Soderberg potline. *Light Metals*. 2000. P. 339—344.
3. Prikaz Rostekhnadzora ot 31.03.2005 No. 182 (eds. 29.11.2005). URL: <http://www.consultant.ru> (accessed: 10.07.2013).
4. Buzunov V., Mann V., Chuchuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter. *Light Metals*. 2013. P. 573—576.
5. Shakhrai S.G., Korostovenko V.V., Rebrik I.I. Sovershenstvovanie sistem kolokol'nogo gazoososa na moshchnykh elektrolizerakh Soderberga [Improving of the fume exhaust system on the powerful Soderberg cells]. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2010.
6. Shakhrai S.G., Sugak E.V. Problemy ochistki gazovykh vy-

- brosov alyuminievykh zavodov i puti ikh resheniya [The problems and solutions of gas emissions cleaning at the aluminium smelters]. *Tekhniko-ekonomicheskii vestnik «Russkogo alyuminiya»*. 2006. No. 14. P. 38—42.
7. Shakhrai S.G., Kulikov B.P., Petrov A.M., Sugak E.V., Kuchkin A.G., Frizorger V.K. Gazosbornoe ustroystvo alyuminievogo elektrolizera (varianty) [The fume exhaust equipment of aluminium cell (versions)]: Pat. 2324012 (RF). 2006.
  8. Kulikov B.P., Storozhev Yu.I. Pylegazovye vybrosy alyuminievykh elektrolizerov s samoobzhigayushchimisya anodami [Gas and dust emissions of the aluminum cells with self-baking anodes]. Krasnoyarsk: Siberian federal university, 2012.
  9. Arkhipov G.V., Mann V.Kh., Pingin V.V., Frizorger V.K., Tretyakov Ya.A., Arkhipov A.G., Shadrin V.G. Ustroystvo dlya sbora i udaleniya gazov iz alyuminievogo elektrolizera Soderberga [The equipment for collection and removal of gas from Soderberg cell]: Pat. 2443804 (RF). 2010.
  10. Frizorger V.K., Shadrin V.G., Puzin A.V., Vinogradov A.M., Anikin V.V., Morenko A.V., Gribkov K.A. Sovershenstvovanie sistemy udaleniya gazov na elektrolizerakh ekologicheskogo Soderberga [Improvement of the domen gas collection system of the environmentally friendly Soderberg cells]. In: *Sbornik nauchnykh statei XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii «Alyuminii Sibiri»* [Collection of scientific articles XVIII Intern. Conf. «Aluminium of Siberia»] (Krasnoyarsk, 5—7 Sept. 2012). Krasnoyarsk: Verso, 2012. P. 408—415.
  11. GOST 17.2.4.07-90. Metody opredeleniya davleniya i temperatury gazopylevykh potokov, otkhodyashchikh ot stacionarnykh istochnikov zagryazneniya [Measurements of pressure and temperature of gas-dust emissions from the stationary sources].
  12. Vinogradov A.M., Dekterev A.A., Neob'yavlyayushchii P.A., Dekterev Ar.A., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Gribkov K.A. Optimizatsiya kupol'noi sistemy udaleniya gazov ot elektrolizera S-8BME [Improvement of the domen gas collection system at S-8BME cells]. In: *Sbornik nauchnykh statei XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii «Alyuminii Sibiri»* [Collection of scientific articles XIX Intern. Conf. «Aluminium of Siberia»] (Krasnoyarsk, 3—6 Sept. 2013). Krasnoyarsk: Verso, 2013. P. 835—845.
  13. Perechen' metodik izmerenii kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv v vybrosakh promyshlennykh predpriyatii, dopushchennykh k primeneniyu v 2015 godu [The list of methods to measure the pollutant concentrations in the industrial emissions]. URL: [http://www.nii-atmosphere.ru/PUBL/per\\_method\\_2015.pdf](http://www.nii-atmosphere.ru/PUBL/per_method_2015.pdf) (accessed: 16.03.2016).
  14. Frizorger V., Mann V., Chuchuk E., Buzunov V., Marakushina E., Pitercev N., Cherskikh I., Gildebrandt E. Vertical stud Soderberg technology development by UC RUSAL in 2004—2010. Part 2. EcoSoderberg technology. *Light Metals*. 2012. P. 749—753.
  15. Burkat V.S., Drukarev V.A., Fuks A.M. Opredelenie effektivnosti sistem organizovannogo gazootsosa v korpusakh elektroliza [Measurement of the efficiency of the gas removal systems in potrooms]. *Tsvetnye metally*. 1996. No. 7. P. 28—30.