

На правах рукописи



Шахрай Сергей Георгиевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ
ПРОИЗВОДСТВА ПЕРВИЧНОГО АЛЮМИНИЯ**

Специальность:

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Красноярск– 2018

Работа выполнена на кафедре теплотехники и гидрогазодинамики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»,

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Скуратов Александр Петрович

Официальные оппоненты: Кузнецов Гений Владимирович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра теоретической и промышленной теплотехники, заведующий кафедрой

Лукин Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет», кафедра теплоэнергетики и теплотехники, заведующий кафедрой

Темлянцев Михаил Викторович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», кафедра теплоэнергетики и экологии, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток

Защита состоится «20» июня 2018 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» [http: www.sfu-kras.ru](http://www.sfu-kras.ru)

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Алюминиевое производство относится к числу базовых отраслей промышленности, где современное высокотемпературное теплотехнологическое оборудование является крупнейшим потребителем энергетических и сырьевых ресурсов. Так, мировая алюминиевая промышленность производит более 57 млн. т/год металла, затрачивая на эти цели около 8 % вырабатываемой электроэнергии. По оценке аналитиков, ежегодно мировое потребление алюминия увеличивается в среднем на 3,8 %, или более чем на 2200 тыс. тонн к объемам существующего производства.

В России при производстве одной тонны металла в электролизерах с предварительно обожженным и с самообжигающимся анодами расходуется 13,0...14,5 и 15...16 тыс. кВт·ч электроэнергии соответственно. Высокое энергопотребление в производстве алюминия является следствием низкой энергетической эффективности алюминиевых электролизеров, не превышающей 45 %, где значительная часть потребляемой энергии рассеивается через его поверхности в виде теплоты в окружающую среду и затрачивается на преодоление сопротивления прианодного газосодержащего слоя электролита и контактных узлов токопроводящей цепи. В общей сложности Российская алюминиевая промышленность на выпуск около 3,6 млн. т/год металла расходует более 60 млрд. кВт·ч электроэнергии, что равно суммарной выработке Красноярской, Братской и Саяно-Шушенской ГЭС или тепловых электростанций, сжигающих 24 млн. т/год угля.

При производстве тонны алюминия образуется около 1,5 тонн газообразных и твердых загрязняющих веществ, из которых порядка 90 % улавливается и обезвреживается системой газоудаления, что недостаточно для достижения допустимого уровня выбросов, установленного Законодательством в области охраны окружающей среды.

Разработка новых и совершенствование существующих конструкций электролизеров осуществляется в основном за счет углубленного изучения и уточнения основных закономерностей процессов газодинамики и тепломассопереноса, протекающих в криолит-глиноземных расплавах. Этим проблемам посвящены труды зарубежных и российских ученых, представителей научных школ ВАМИ, СибВАМИ, ИТЦ РУСАЛ, СФУ, ИрГТУ, СибГИУ, ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН и ряда др. Однако большинство этих трудов направлены преимущественно на решение локальных задач, где формирование выбросов в электролизере и технология их обезвреживания не рассматриваются как единая задача, а имеющиеся ресурсы в области энергосбережения задействованы не в полной мере.

В связи с этим, актуальной научной проблемой для производителей алюминия является разработка научно обоснованного комплекса технических и технологических решений по

повышению энергетической эффективности и экологических показателей оборудования для производства первичного алюминия, обеспечивающих уменьшение энергетических затрат на единицу производимой продукции, сбережение материальных ресурсов и защиту окружающей среды.

Исследование выполнено в рамках тем: «Разработка технологии получения алюминия со снижением расхода электроэнергии на действующих электролизерах на 300...1000 кВт·ч/т Al»; «Фундаментальные исследования создания основ современных энергосберегающих и экологически чистых технологий производства алюминия в электролизерах с самообжигающимся анодом» (соглашение с Минобрнауки РФ о предоставлении субсидии № 14.579.210032 от 05.06.2014 г., проект НИЧ СФУ № 17-48-240595 от 19.05.2017 г.).

Объект исследования – алюминиевые электролизеры Содерберга и их система газоудаления, включающая газосборный колокол, газоходную сеть корпуса и горелки для сжигания анодных газов.

Предмет исследования – процессы горения, аэрогазодинамики и тепломассообмена.

Цель диссертационной работы. Разработка научно обоснованного комплекса технических и технологических решений, направленных на повышение энергетической эффективности и экологических показателей теплотехнологического оборудования для производства первичного алюминия.

Задачи исследования:

1. Обобщить имеющиеся исследования в области энергосбережения и обеспечения экологической безопасности производства алюминия, проанализировать степень их проработки, выявить скрытые ресурсы, разработать и предложить методы их использования.
2. Разработать научно обоснованные технические и технологические решения по снижению потерь теплоты, потребления электроэнергии и негативного воздействия на окружающую среду алюминиевыми электролизерами.
3. Расчетно-экспериментальным путем определить технологические границы горения анодного газа и геометрические параметры горелок, обеспечивающие полное сгорание смолистых веществ, содержащихся в сжигаемых анодных газах.
4. Выполнить оценку влияния газовых и пылевых балластных примесей сжигаемого анодного газа на эффективность и устойчивость работы горелок электролизера.
5. Исследовать аэрогазодинамические, тепло- и массообменные процессы, протекающие в электролизерах и их системах газоудаления, разработать способы повышения эффективности процессов, обеспечивающих сокращение расхода энергетических и материальных ресурсов и уровня выбросов загрязняющих веществ.

6. Разработать комплексную инженерную методику расчета параметров системы газоудаления электролизера с самообжигающимся анодом в условиях увеличения силы тока и закрученного газопылевого потока в газоходной системе электролизера.

7. Выполнить опытно-промышленные испытания разработанных технических и технологических решений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке комплекса научно обоснованных технических и технологических решений, обеспечивающих снижение потребления энергоресурсов и выбросов загрязняющих веществ как действующими, так и проектируемыми электролизерами для получения первичного алюминия. При этом:

- теоретически и экспериментально обоснован комплекс взаимосвязанных мероприятий по сбережению энергетических ресурсов алюминиевыми электролизерами Содерберга, заключающихся в сокращении потерь теплоты поверхностями электролизера, утилизации теплоты анодных газов, уменьшении затрат теплоты на нагрев и растворение в электролите глинозема, снижении объема прианодного газоелектролитного слоя, образующегося в результате окисления анода;

- разработана методология теплотехнического расчета системы газоудаления электролизеров с самообжигающимся анодом, позволяющая провести комплексный анализ влияния геометрических и режимных параметров газосборного колокола, горелок и газоходной сети на ее технико-экономическую эффективность в условиях увеличения силы тока процесса электролиза;

- установлено предельное значение избытка воздуха $\alpha = 3,5$, превышение которого снижает концентрацию горючих компонентов до уровня, находящегося ниже нижнего концентрационного предела воспламеняемости, а температуру в зоне горения – до уровня, недостаточного для поддержания горения. Выявлено, что одной из причин погасания горелок является коагуляция пыли, содержащейся в сжигаемых анодных газах, и рост концентрации пылевых конгломератов в зоне горения. Определено, что критическая концентрация конгломератов, приводящая к погасанию горения, достигается за $3,5 \dots 6,5$ ч;

- на основе математического моделирования научно обоснована целесообразность оборудования горелок дисковыми турбулизаторами и определены их конструктивные параметры, обеспечивающие увеличение пути смешивания сжигаемых в них анодных газов с воздухом и возможность регулирования при этом разрежения в системе газоудаления, а также системой импульсной очистки от пылевых отложений за счет периодического увеличения давления в горелке от -20 Па до $400 \dots 500$ кПа в течение $0,5 \dots 1,0$ с;

- получены новые температурно-временные зависимости воспламенения и горения основных компонентов смолистых веществ, содержащихся в сжигаемых анодных газах:

нафталина, антрацена и бенз(а)пирена, установлено, что их горение происходит соответственно при 290...330, 400...440 и 1270...1330 °С. Выявлено, что при температуре 750 °С и более полное дожигание нафталина и антрацена достигается соответственно в течение 0,5 и 0,2 с. Определено, что при сжигании нафталина и антрацена в условиях недостатка воздуха происходит их пиролиз с образованием этилена, метана, ацетилена, сажи, а также возгонов исходных веществ;

– разработан научно обоснованный подход к решению проблемы повышения эффективности улавливания и обезвреживания образующихся в алюминиевом электролизере загрязняющих веществ, заключающийся в том, что система газоудаления алюминиевого электролизера рассматривается как единый и взаимосвязанный комплекс, где характер и интенсивность аэрогазодинамических, тепло- и массообменных процессов, протекающих в каждом ее конструктивном элементе, являются определяющей в оценке эффективности работы смежных элементов;

– в результате численных исследований разработаны конструкции газосборного колокола, отличающиеся от проектируемых 1,5...2,0-кратным увеличением объема подколокольного пространства и параболоидной конфигурацией его поперечного сечения, обеспечивающие улучшение условий работы горелок за счет снижения аэродинамического сопротивления в 3...4 раза, исключение образования вторичных течений анодных газов, а также повышение эффективности сбора анодных газов на уровне 94...96 % и сокращение удельных выбросов фторидов на 0,7...0,8 кг/т Al;

– на основе теоретического исследования установлено, что для очистки газоходных сетей корпусов электролиза от пылевых отложений целесообразна закрутка потока анодных газов за счет ввода в газоход сжатого воздуха под углом 36...48° по отношению к его продольной оси.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Разработаны, испытаны и рекомендованы к внедрению в промышленное производство алюминия технические и технологические решения по энерго- и ресурсосбережению, основанные на снижении теплоты поверхностями электролизера, утилизации теплоты анодных газов и сокращении энергетических затрат при их транспортировке по газоходным сетям, уменьшении потерь электрической энергии на газосодержащем слое электролита.

2. Разработаны диаграммы и таблицы, позволяющие оценить влияние:

– коэффициента избытка воздуха и объема горелки на температуру в зоне горения, верхние и нижние пределы воспламеняемости сжигаемой смеси и время ее нахождения в зоне высоких температур;

– коэффициента избытка воздуха, температуры и скорости потока в зоне горения, вязкости газовой смеси и размеров частиц пыли на интенсивность ее коагуляции и скорость седиментации образующихся конгломератов.

3. Разработаны и внедрены в промышленном масштабе технические и технологические решения по повышению экологической безопасности производства алюминия путем увеличения эффективности сбора и обезвреживания загрязняющих веществ, образующихся в процессе электролиза. Разработанные рекомендации по совершенствованию газоходной сети приняты в качестве исходных при проектировании модернизированных систем газоудаления корпусов электролиза алюминиевых заводов.

4. Разработаны и запатентованы новые способы и устройства снижения потерь теплоты и энергопотребления алюминиевыми электролизерами, повышения эффективности улавливания и обезвреживания вредностей, выделяющихся в процессе электролиза (№№ 2558813, 2586184, 2456380, 2456383, 2534712, 163339, 157373, 2309200, 2407827, 2437966, 2464360, 2324012, 2397278, 95669, 95670, 2399697, 2532792, 2569866, 68512, 69868, 2385973, 2542180, 2555302, 2585601, 2586184, 2621322).

5. Внедрение результатов работы обеспечивает снижение удельного расхода электроэнергии в среднем на 900 кВт·ч/т Al; сокращение удельных выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, кг/тAl: газообразных соединений фтора – 0,20, твердых соединений фтора – 0,28, смолистых веществ (по нафталину – 0,55, бенз(а)пирена – 0,00088, оксида углерода – 44,7, диоксида серы – 0,55, пыли неорганической с содержанием SiO₂ до 20 % – 0,77. При этом удельное сокращение металлоемкости технологического процесса производства алюминия составляет 0,0027 кг/т Al. Суммарный экономический эффект от внедрения разработанных технических и технологических мероприятий заключается в снижении себестоимости производимого металла на 2289,8 руб/т Al.

6. Результаты работы используются в учебном процессе Сибирского Федерального университета при подготовке бакалавров и магистров по специальностям, включающим дисциплины «Промышленная теплоэнергетика», «Промышленная экология» и «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», а также в курсах, организуемых для повышения квалификации работников алюминиевых заводов России.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Направления повышения энергетической эффективности и экологической безопасности теплоиспользующих установок для получения первичного алюминия.

2. Научное обоснование технических и технологических решений, обеспечивающих снижение потерь теплоты конструктивными элементами электролизера, утилизацию теплоты эвакуируемых от электролизеров анодных газов, уменьшение падения напряжения на газо-

содержащем слое электролита и сокращение энергетических затрат на эксплуатацию газоходных сетей корпусов производства алюминия.

3. Методология комплексного теплотехнического расчета элементов системы газоудаления в условиях увеличения силы тока электролизера с самообжигающимся анодом.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния технологических, режимных и конструктивных параметров на процессы горения, аэрогазодинамики, тепло- и массообмена в электролизерах и элементах системы газоудаления.

5. Технические и технологические решения, а также разработанные способы и устройства, обеспечивающие снижение потребления энергоресурсов и выбросов загрязняющих веществ электролизерами для получения первичного алюминия.

Методы исследований. Работа выполнена с использованием современных теоретических и физических методов исследования теплотехнологических процессов, статистической обработки и формализации полученных результатов. Теоретический анализ проводился на основе известных аналитических методов расчета и аппарата численного моделирования, экспериментальный – на лабораторных и промышленных объектах согласно действующим стандартам с привлечением методов и средств измерений технологических и теплотехнических параметров.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы, выводов и рекомендаций основывается на использовании современных и апробированных методах теоретического и физического анализа процессов горения, аэрогазодинамики, тепло- и массообмена в алюминиевых электролизерах и их системах газоудаления. Исходные данные для исследования получены в ходе натурных обследований и инструментальных измерений технологических и теплотехнических параметров оборудования с последующей их статистической обработкой и определением доверительных интервалов. Результаты расчетов вполне удовлетворительно согласуются с данными экспериментов на действующих электролизерах и лабораторных установках.

Личный вклад автора заключается в постановке задач и проведении теоретических и экспериментальных исследований; разработке, обосновании и патентной защите новых конструкций электролизеров для получения алюминия, способов их эксплуатации и обслуживания; проведении организационно-технических мероприятий по опытно-промышленным испытаниям и промышленному освоению разработанных технических решений; обработке полученных результатов; анализе, обобщении, научном обосновании и формулировании выводов и рекомендаций.

Все приведенные в диссертации основные положения, теоретические результаты и технические решения получены и разработаны лично автором или при его непосредственном

участии. При анализе результатов работы использовались консультации Архипова Г.В., Дектерева А.А., Крюковского В.А., Полякова П.В., Прошкина А.В., Ребрика И.И., Сторожева Ю.И.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие и природозащитные технологии в производстве глинозема, алюминия, магния и сопутствующей продукции», посвященной 75 –летию ВАМИ (Санкт-Петербург, 2006); XII – XIV Международных конференциях «Алюминий Сибири» (Красноярск, 2006, 2007, 2008); IV Международной научно-технической конференции «Современные технологии освоения минеральных ресурсов» (Красноярск, 2006); V Международном конгрессе по управлению отходами и природоохранным технологиям «ВэйстТЭК – 2007» (Москва, 2007); IV Международной конференции «Реконструкция металлургических производств. Современные экологические технологии и повышение эффективности предприятий» (Москва, 2008); I – VI Международных конгрессах «Цветные металлы» (Красноярск, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014; 2015; 2016; 2017), Международной научно-практической конференции «Инновационный вектор развития: предпосылки, реальность, перспективы» (С-Петербург, 2014), VI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (с участием иностранных ученых) (Кемерово, 2005); IV заседании Международного клуба Содерберг (Красноярск, 2008); Международной летней школе «Глобальные изменения климата», г. Красноярск, 2014.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 109 печатных работ, в том числе две монографии, 17 статей в изданиях, входящих в наукометрическую базу Scopus, 25 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получено четыре Евразийских патента на изобретения и 29 патентов РФ на изобретения и полезные модели.

Объем и структура. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, библиографического списка из 273 наименований и приложений. Общий объем работы 289 страниц, в том числе 33 таблицы и 123 рисунка.

Автор выражает искреннюю признательность за большую помощь при постановке исследований и реализации результатов коллегам из ФГАОУ ВО СФУ, ФГБОУ ВО ИрНТУ и ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», а также сотрудникам ОК РУСАЛ (ИТЦ, Красноярского, Братского, Новокузнецкого, Иркутского и Саяногорского алюминиевых заводов), НТЦ «Легкие металлы», ООО ТОРИНС.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные результаты, являющиеся предметом защиты.

В первой главе представлен критический анализ современного состояния энергетической эффективности и экологической безопасности электролизеров для получения первичного алюминия.

Теории тепло- и массообмена в криолит-глиноземных расплавах посвящены работы Баймакова Ю.М., Бажина В.Ю., Баранова А.Н., Бегунова А.И., Борисоглебского Ю.В., Бурнакина В.В., Ветюкова М.М., Галевского Г.В., Крюковского В.А., Минциса Я.М., Михалева Ю.Г., Полякова П.В., Цыплакова А.М., Школьников С.Н., Янко Э.А. В их трудах исследованы основные закономерности формирования газосодержащего слоя электролита алюминиевого электролизера, растворения глинозема в криолит-глиноземных расплавах, потерь теплоты электролизером и затрат электроэнергии на преодоление сопротивления его электрической цепи.

Вопросам повышения энергетической эффективности и экологической безопасности алюминиевых электролизеров посвящены научные работы Бузунова В.Ю., Бурката В.С., Дектерева А.А., Кондратьева В.В., Крюковского В.А., Куликова Б.П., Панова Е.Н., Пингина В.В., Пискажовой Т.В., Прошкина А.В., Скуратова А.П., Смоля В.И., Сторожева Ю.И. и др.

В мировой и российской алюминиевой промышленности основным направлением повышения энергетической эффективности и экологической безопасности производства алюминия является создание мощных высокоамперных электролизеров с предварительно обожженным анодом, совершенствование технологии электролиза и применение современных углеродных материалов для футеровки катодных узлов ванн. Однако, реалии российской алюминиевой промышленности таковы, что более 65 % отечественного металла производится в электролизерах с самообжигающимся анодом. Электролизеры этого типа в течение последних 20...30 лет подверглись существенной модернизации, в результате чего их производительность относительно проектной повышена на 20...25 %. При этом система газоудаления электролизера практически не претерпела изменений, в результате чего эффективность улавливания загрязняющих веществ составляет порядка 90 %, что недостаточно для достижения допустимого уровня выбросов, установленного современными нормативными документами в области охраны окружающей среды. Критический анализ ее состояния показывает несоответствие технологических, конструкторских и эксплуатационных параметров системы газоудаления современному уровню развития технологии электролиза. В частности не рас-

считается возможность сокращения потребления энергоресурсов и экономических затрат за счет рационализации конструктивных и операционных параметров системы газоудаления и утилизации теплоты анодных газов, снижения потерь теплоты электролизером в окружающую среду и затрат электроэнергии на их компенсацию. Остается нерешенной актуальная проблема сокращения газонаполненности электролита – одной из основных причин высокого расхода электроэнергии и уменьшения выхода по току.

Проведенный обзор технической литературы показал, что исследования диссертационной работы должны быть направлены на решение перечисленных выше проблем. На основе проведенного аналитического обзора состояния вопроса сформулирована цель работы и обоснованы задачи исследования.

Во второй главе дано описание принятой методологии проведения экспериментальных работ на промышленных объектах и лабораторных установках.

При постановке экспериментальных работ ставилась задача, заключающаяся в комплексном изучении теплотехнологических процессов протекающих в электролизерах и элементах газовой системы. Основным интерес при изучении закономерностей тепломассообмена, горения и аэрогазодинамики представляло получение надежных технологических и теплотехнических данных, позволяющих использовать их как для теоретического анализа, так и для научного обоснования разработанных практических рекомендаций по повышению энергетической эффективности и экологических показателей оборудования для производства первичного алюминия.

Экспериментальные исследования параметров дожигания смолистых веществ, содержащихся в сжигаемых анодных газах, проводились с помощью установки, показанной на рис. 1.

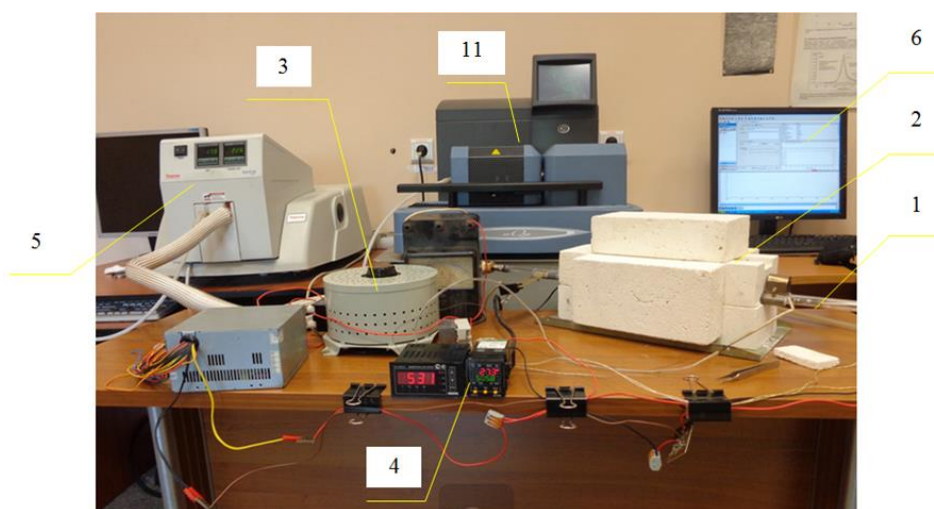


Рис. 1– Экспериментальная установка для сжигания смолистых веществ:
1 – трубчатая печь; 2 – шамотная футеровка; 3 – ЛАТР; 4 – реле-регулятор ТРМ-10 фирмы «Овен»; 5 – термоанализатор SDTQ600; 6 – персональный компьютер

Трубчатая печь, футерованная шамотным кирпичом, обогревается помещенными в кварцевую трубку карбидокремниевыми элементами. Управление температурой в печи осуществлялось с помощью лабораторного автотрансформатора и реле-регулятора ТРМ-10 фирмы «Овен». Испарение проб нафталина и антрацена осуществлялось из корундового тигля объемом 80 мкл, помещенного внутрь трубчатой печи и дополнительно обогреваемого нагревательным элементом. Приток воздуха или инертного газа (аргона) в трубчатую печь контролировался электронным ротаметром, входящим в состав термоанализатора марки SDTQ600. Газы после дожига анализировались на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 380 с газовой приставкой TGA/FT-IR.

Оценка скорости растворения предварительно нагретого глинозема проводилась путем его перемешивания в электролите с фиксацией времени его полного растворения. Температуру загружаемого в электролизер глинозема оценивали с помощью переносного прибора «Testo 835-T2», пределы измерений $-40...+500\text{ }^{\circ}\text{C}$, погрешность измерений $\pm 0,5\%$ от измеренного значения. После загрузки в электролизер, глинозем тщательно перемешивался шумовкой до полного растворения в электролите. Время растворения оценивалось с помощью электронного секундомера СЧЕТ-1М. Температура электролита до и после загрузки в него глинозема оценивалась с помощью преобразователя термоэлектрического ТП 2488 (пределы измерений $-40...+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, погрешность измерений $\pm 0,0074\text{t}$). Для испытаний использовался глинозем с температурой $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и осуществлялся его ступенчатый нагрев до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в бункере АПГ испытуемого электролизера № 1265.

Для оценки снижения потерь через поверхности электролизера, его газосборный колокол (ГСК) по наружной поверхности оборудовался теплоизоляционными материалами: асбестовой тканью или асбокартоном толщиной 8 мм. Испытания проводились в зимнее время года при температуре наружного воздуха $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Измерения температуры производились с помощью бесконтактного инфракрасного термометра (пирометра) Thermopoint, имеющего рабочий диапазон от 50 до $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ и лазерный целеуказатель. Погрешность измерений в диапазоне температур $-20...200$ и $200...538\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляла $\pm 1,5$ и $\pm 2\%$ соответственно, время отклика не превышало 1 с. Расчет потерь теплоты производился с учетом градиента температур наружной и внутренней сторон однослойной и многослойной стенок.

Эффективность работы системы газоудаления оценивалась с помощью системы автоматического контроля температуры и разрежения на выходе из горелочных устройств, визуальных наблюдений и сравнительного анализа в лабораторных условиях проб пыли, отобранных после испытуемых горелок и горелок сравнения.

Определение модуля упругости и прочности на сжатие укрывного материала (УМ) анодного массива в интервале температур от 20 до $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ проводилось с помощью измери-

тельного комплекса ИК-4. Эксперимент включал в себя нагрев образца спеченного УМ до заданной температуры и два цикла его нагрузки усилием 500 ± 100 Н с выдержкой 30 минут и последующей разгрузкой.

Теплопроводность спеченных образцов УМ определялась с помощью измерительного комплекса ТЭП, включающего в себя электропечь с подключенным персональным компьютером, фиксирующим измеряемые параметры при стационарных температурах $25 \dots 950$ °С.

Измерение объемов газоудаления от электролизеров проводилось по методике ГОСТ 17.2.4.06-90 «Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения», с использованием метрологически поверенных напорной трубки конструкции НИИОГАЗ и манометра дифференциального цифрового ДМЦ-01М. Диапазон измерений манометра дифференциального $0 \dots 2000$ Па, предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений $\pm 1,5$ Па.

Третья глава посвящена развитию теоретических основ и разработке научно обоснованных технических решений повышения энергетической эффективности алюминиевых электролизеров за счет уменьшения теплоты на нагрев и растворение загружаемого в расплав глинозема, сокращения потерь теплоты поверхностями электролизера в окружающую среду, снижения объема прианодного газоэлектролитного слоя, на преодоление сопротивления которого электролизер затрачивает от 5 до 8 % потребляемой энергии.

Затраты теплоты на нагрев загружаемого в электролизер глинозема до температуры электролита характеризуются зависимостью:

$$C_{\Gamma} M_{\Gamma} \frac{dT_{\Gamma}}{dt} = \alpha_{\text{э}} (T_{\text{э}} - T_{\Gamma}) S_{\Gamma}, \quad (1)$$

где $T_{\text{э}}$ и T_{Γ} – соответственно температура электролита и глинозема, К; C_{Γ} – теплоемкость глинозема; M_{Γ} – масса загружаемой порции; S_{Γ} – площадь теплообмена; $\alpha_{\text{э}}$ – коэффициент теплообмена.

В соответствии с зависимостью (1), затраты теплоты на растворение глинозема определяются его начальной температурой. На нагрев глинозема рационально использовать теплоту окисления анода и анодных газов, уносимую в систему газоудаления. Тепловой эффект сгорания углерода (анода) в процессе электролиза определяют согласно зависимости:

$$Q_{\text{ан}} = P_{\text{CO}_2} \Delta H_T^{\text{CO}_2} + P_{\text{CO}} \Delta H_T^{\text{CO}}, \quad (2)$$

Количество теплоты, уносимой от электролизера с анодными газами, согласно зависимости:

$$Q_{\text{газ}} = P_{\text{CO}_2} \Delta H_{T_2 \text{CO}_2}^{T_1} + P_{\text{CO}} \Delta H_{T_2 \text{CO}}^{T_1}, \quad (3)$$

(3)

где P_{CO_2} и P_{CO} – количество образующихся в электролизере CO_2 и CO ; ΔH_T^{CO} и $\Delta H_T^{CO_2}$ – энтальпии реакций окисления углерода до CO_2 и CO ; $\Delta H_{T_2CO_2}^{T_1}$ и $\Delta H_{T_2CO}^{T_1}$ – изменение энтальпии CO_2 и CO в интервале температур от T_2 до T_1 .

Расчеты показывают, что в систему газоудаления с анодными газами уносится теплота в количестве, в 3...4 раза превышающем затраты на нагрев до 200...250 °С и растворение в электролите загружаемого в электролизер глинозема. Загрузка в электролизер нагретого до этих температур глинозема сокращает удельный расход электроэнергии на 80...110 кВт·ч/т Al, что подтверждено результатами опытно-промышленных испытаний.

Осуществлять нагрев глинозема предлагается в теплообменнике, используемом как бункер системы автоматической подачи глинозема (АПГ) в электролизер (рис. 2).

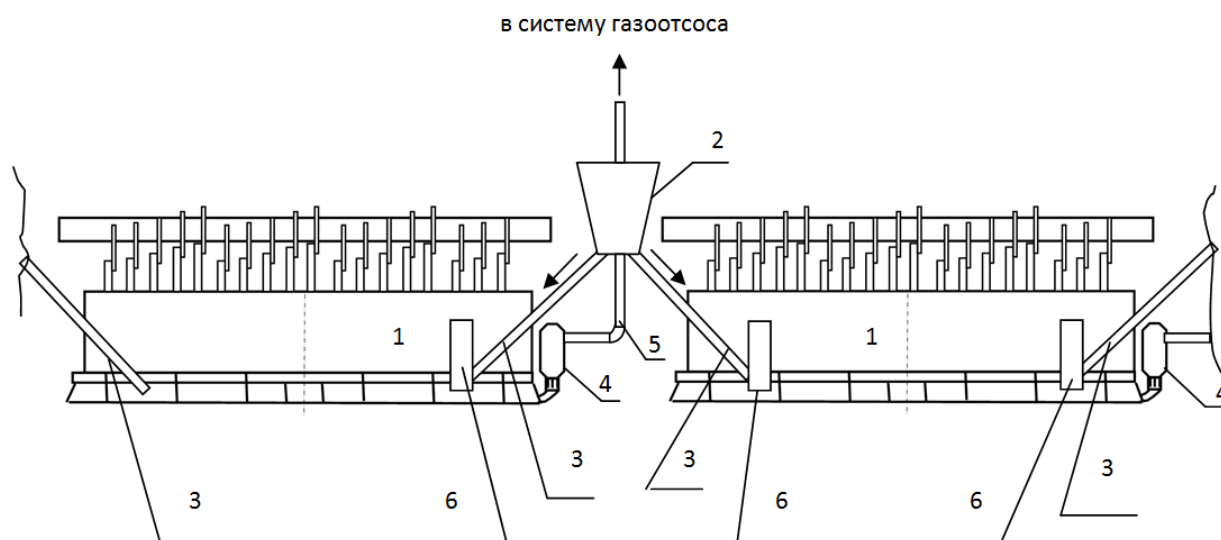


Рис. 2 – Способ и устройство утилизации теплоты анодных газов алюминиевого электролизера:

- 1 – электролизер; 2 – теплообменник-бункер АПГ; 3 – трубопровод подачи нагретого глинозема в электролизер; 4 – горелка; 5 – газотводящий патрубок горелки; 6 – пробойник системы АПГ (патент РФ № 2558813)

Для снижения потерь теплоты поверхностями электролизера в окружающую среду предлагается оборудовать ГСК тепловой изоляцией (патент РФ № 2569866). За счет уменьшения градиента температур внутренней и наружной поверхностей стенок, сокращение удельного расхода электроэнергии на компенсацию тепловых потерь составляет 130...150 кВт·ч/т Al, что подтверждено результатами опытно-промышленных испытаний.

В целях оптимизации потерь теплоты через поверхность укрытия анодного массива, разработано четыре состава укрывных материалов (УМ), отличия которых от состава используемой в настоящее время криолито-глиноземной шихты (КГШ) заключается во введе-

нии крупных фракций дробленого электролита размером от 2 до 12,5 мм в количестве от 7 до 45 % масс. Исследования показали, что предложенные составы УМ при спекании в электролизере под воздействием высоких температур образуют корки с более высокой, чем КГШ, теплопроводностью (рис. 3). Это позволяет регулировать отвод теплоты через поверхность укрытия анодного массива в зависимости от технологических параметров процесса электролиза (междуполусного расстояния между анодом и катодом, силы тока процесса электролиза, пр.).

Для снижения тепловых потерь через поверхность УМ, надежной защиты анода от окисления, сокращения расхода КГШ и уменьшения времени образования на поверхности УМ прочной корки, разработан способ укрытия анодного массива в два слоя (патент РФ № 2586184). Первый слой – КГШ, который в результате плавления входящих в ее состав фтористых солей в

течение 1,0...1,5 ч образует прочную корку с низкой газопроницаемостью, но высокой теплопроводностью, порядка 1,5...1,6 Вт/(м·К), что приводит к высоким потерям теплоты через поверхность УМ. С целью предотвращения этих потерь, на поверхность спеченной корки наносится второй слой глинозема.

Основные потери электроэнергии в электролизере, от 5 до 8 %, являются следствием преодоления сопротивления газовых пузырей, образующихся под анодом вследствие его окисления. Объем газов зависит преимущественно от габаритов анода – его длины и ширины, уменьшить которые предлагается за счет разделения самообжигающегося анода на границе между коксо-пековой композицией и зоной полукокса горизонтальной перегородкой, оборудованной вертикальными ячейками, в которых анод формируется отдельными блоками, удерживаемыми в ячейке 4÷8 токоподводящими анодными штырями (рис. 4).

Анодные газы, образующиеся при коксовании и окислении анода, по зазорам между ячейками движутся к газоотводящим патрубкам, откуда они направляются в систему газоподведения. Таким образом, отпадает потребность в газосборном колоколе.

Для оценки эффективности предлагаемого решения выполнено моделирование движения газового слоя под анодом. Математическая модель включает уравнения гидродинамики и свободной границы жидкого электролита. Течение анодных газов моделируется в по-

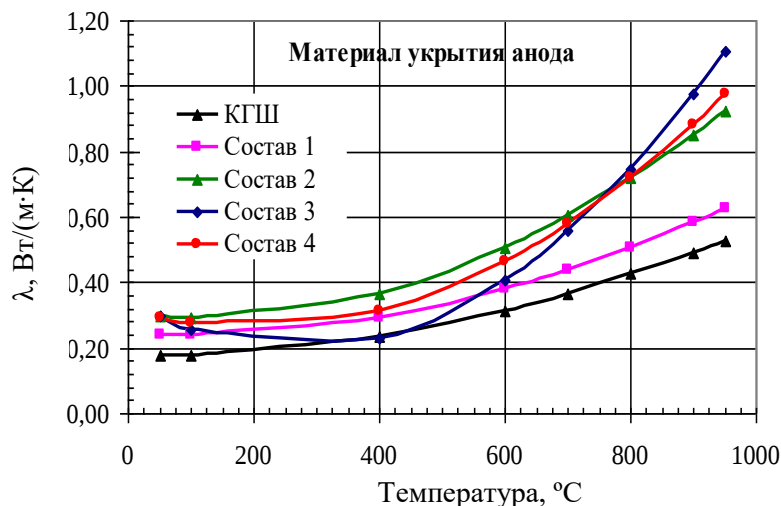


Рис. 3 – Зависимость коэффициента теплопроводности λ УМ от температуры

становке несжимаемой жидкости с переменной во времени плотностью. Основные транспортные уравнения данной модели имеют вид:

$$\frac{d\rho k}{dt} + \nabla(\rho k v) = \nabla \Gamma_k \nabla k + G_k, \quad (4)$$

$$\frac{d\rho \omega}{dt} + \nabla(\rho \omega v) = \nabla(\Gamma_\omega \nabla \omega) + G_\omega, \quad (5)$$

где ω – удельная скорость диссипации, Γ_k и Γ_ω – обобщенные коэффициенты диффузии, G_k и G_ω – источниковые слагаемые.

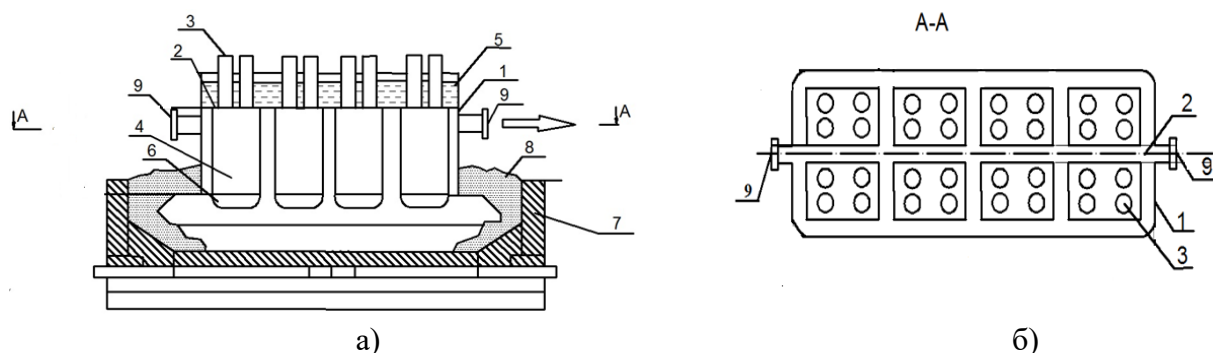


Рис. 4 – Электролизер с секционированным анодом:

а и б – продольный разрез электролизера и его анодного узла; 1 – анодный кожух; 2 – горизонтальная перегородка; 3 – токоподводящие анодные штыри; 4 – ячейки анода; 5 – слой коксопекковой композиции; 6 – спекшиеся анодные блоки; 7 – катодный узел электролизера; 8 – криолитоглиноземная корка; 9 – газоудаляющий патрубок

Для решения задачи использовался метод жидкости в ячейках: жидкость и газ рассматриваются как единая двухкомпонентная среда, и пространственное распределение фаз в пределах расчетной области определяется при помощи специальной функции маркера $F(x, y, z, t)$. Эта функция в начальный момент задается следующим образом:

$$F(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, & \text{если ячейка пустая;} \\ 1, & \text{если ячейка полная;} \\ \text{объемная доля жидкости, если через ячейку проходит свободная граница.} \end{cases}$$

Вычислительный эксперимент по определению объема газозлектролитного слоя проводили при следующих граничных условиях: габариты анода от 2,80x8,40 м до 1,35x1,60 м, криолитовое отношение электролита 2,20...2,25, глубина погружения анода в электролит 15 см, расход анода 550 кг/т Al, сила тока процесса электролиза 175 кА, удельный объем образующихся анодных газов 42...45 нм³/ч. На нижней поверхности анода задавался расход

анодного газа. Распределение газовой фазы в электролите для вариантов расчета исходного моноблочного и секционированного анодов представлено на рис. 5 и 6.

Видно, что при вариантах с моноблочным и секционированным анодом расчетная толщина газового слоя (пузыря) под подошвой анода составила 7,5 и 5 мм соответственно. Установлено, что за счет уменьшения толщины газового слоя с 7,5 до 3 мм площадь газовых пленок, покрывающих подошву анода, не превышает 50 % его площади, падение напряжения на газосодержащем прианодном слое секционированного анода снижается до 300...400 мВ (рис. 7) против 600...800 мВ на моноблочном аноде, а удельный расход электроэнергии в электролизерах силой тока 175 кА уменьшается на 520...870 кВт·ч/т Al.

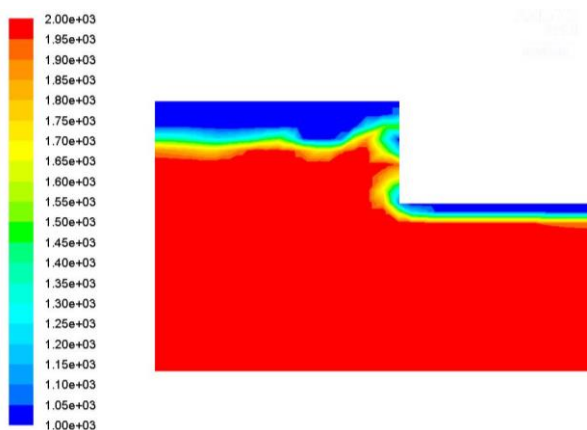


Рис. 5 – Толщина газового слоя под моноблочным анодом

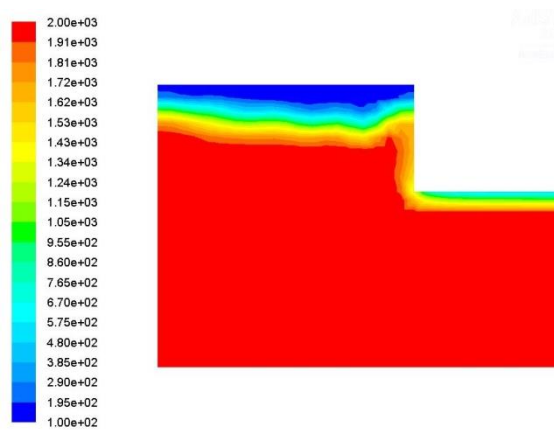


Рис. 6 – Толщина газового слоя под секционированным анодом

Анализ показывает, что при секционировании самообжигающегося анода отпадет потребность в установке ГСК. Это позволяет: увеличить поверхности анодного кожуха и самообжигающегося анода (за исключением площади газоотводящих каналов) соответственно на 6...7 и 3...4 м²; снизить потери напряжения в аноде за счет уменьшения плотности тока или, при сохранении ее существующего уровня, повысить силу тока при электролизе до 190...200кА и производительность электролизера на 10...12 %.

Кроме этого, увеличение площади анодного кожуха на 6...7 м² уменьшает площадь открытой корки.

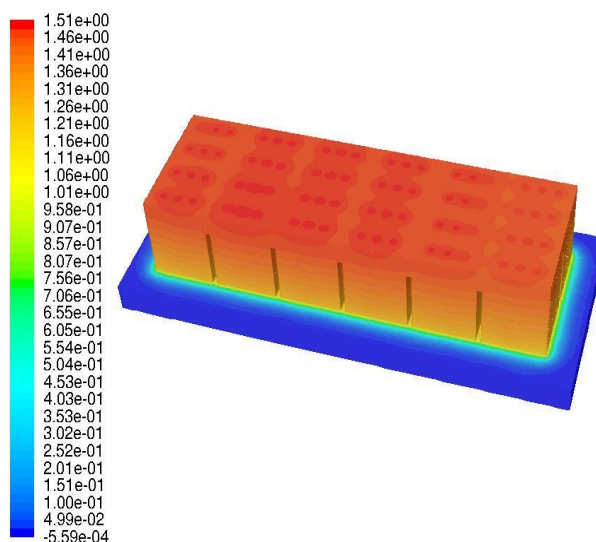


Рис. 7 – Падение напряжения на газосодержащем слое секционированного анода, В

Четвертая глава посвящена решению проблем увеличения эффективности улавливания и сжигания в горелках анодных газов, образующихся в процессе электролиза, а также совершенствованию газоходных сетей.

В качестве математической модели для описания течения анодных газов в подколочном пространстве и газоходной сети принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. Течение газа считается установившимся, поэтому уравнения неразрывности, баланса количества движения относительно осей координат, переноса концентрации компонент и переноса энергии записываются в стационарной постановке. Искомые зависимыми переменными являются три компоненты скорости u, v, w (проекции вектора скорости на оси x, y, z), давление p , энтальпия h , концентрации газовых компонент Y_m ($N_2, O_2, CO_2, H_2O, CO, H_2, CH_4$) и характеристики турбулентности k и ε . Отметим, что при выводе уравнений турбулентного течения использован предложенный Рейнольдсом подход – мгновенные значения гидродинамических параметров потока представлены в виде суммы осредненной величины и ее пульсационной составляющей.

Так, уравнения переноса концентрации компонент и энергии записать в виде:

$$\frac{d(\rho u Y_m)}{dx} + \frac{d(\rho v Y_m)}{dy} + \frac{d(\rho w Y_m)}{dz} = \frac{d}{dx} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{dY_m}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{dY_m}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{dY_m}{dz} \right) + S_m, \quad (6)$$

$$m = 1, \dots, N;$$

$$\frac{d(\rho u h)}{dx} + \frac{d(\rho v h)}{dy} + \frac{d(\rho w h)}{dz} = \frac{d}{dx} \left(\frac{\mu C_p}{Pr} \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{\mu C_p}{Pr} \frac{dT}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(\frac{\mu C_p}{Pr} \frac{dT}{dz} \right) + S_{ch} + S_R, \quad (7)$$

где ρ – плотность газа, $кг/м^3$; Pr – число Прандтля; Sc – число Шмидта; C_p – удельная теплоемкость газов; S_m, S_{ch}, S_R – источниковые члены в уравнениях соответственно за счет изменения массы и теплоты в процессе реагирования и притока теплоты за счет излучения.

Расчет химической кинетики горения газового топлива основан на использовании глобальных необратимых реакций между горючими и окислителем с использованием ряда моделей горения: кинетической (скорость горения i -го реагента определяется соотношением Аррениусовского типа), «обрыва вихря» (скорость горения ограничивается скоростью турбулентного перемешивания топлива и окислителя), гибридной, которая использует обе модели и в качестве результирующей выбирается наименьшая из скоростей.

Кинетическая энергия турбулентности k и скорость диссипации турбулентности ε на входе оцениваются по соотношениям вида:

$$k_{in} = k_{in}^0 (u_{in}^2 + v_{in}^2 + w_{in}^2); \quad \varepsilon = \varepsilon_{in}^0 k_{in}^{3/2}, \quad (8)$$

где $k_{in}^0 = 0,01$, $\varepsilon_{in}^0 = \frac{C\mu}{L}$, L – характерный размер энергосодержащих вихрей.

Энтальпия на входе вычисляется по заданным температуре и составу газов. Граничные условия для Y_{in} задаются в виде массовых долей.

Расчеты газовой сети корпуса электролиза выполнены с помощью программного комплекса *σNet*, позволяющего формировать задачи, содержащие сильно разветвленные системы трасс, производить многопараметрический анализ с учетом их теплообмена с окружающей средой и химического реагирования компонентов анодных газов. Математическая модель газовой сети базируется на классических уравнениях неразрывности потока, баланса количества движения относительно осей координат (уравнения движения Навье – Стокса) и переноса энергии.

При моделировании в узлах сети обеспечивается закон сохранения массы и энергии в форме уравнений баланса потока массы и потока тепловой энергии. На ветвях сети предполагается стабильность расходов газа. Каждая ветвь характеризуется зависимостью, связывающей перепад давления с расходом газа через ее сечение. Согласование давлений во всех узлах системы при заданных зависимостях, относящихся к отдельным ветвям, приводит к системе уравнений, решение которой при заданном распределении температур основано на методе «поузловой увязки давлений». Для решения полученной системы уравнений, вследствие большого диапазона локальных и распределенных коэффициентов сопротивлений различных участков газовой сети, применяется регуляризованный метод Ньютона. После завершения узловой увязки давлений становятся определенными газовые потоки во всех ветвях сети.

Решение задачи распределения многокомпонентного потока в сети сводится к комбинации задач распределения несущего потока (массовый расход или нормально-объемный расход) диффузией и изменения его характеристик (концентрации компонент, энтальпии и т.д.) за счет конвекции. Используя матрицу связей, распределение потока в сети можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{l \in u_i} \nabla_{il} u_l &= q_i, i \in N; \\ \sum_{l \in N} \nabla_{il} p_i &= h_i(u_l), l \in N, \end{aligned} \tag{9}$$

где u_l – вычисляемый несущий поток на ветви, q_i – источник в узле, p_i – потенциал в узле, а $h_i(u_l)$ – нелинейный закон падения потенциала на ветви.

Для вычисления концентраций компонент и температуры в участках сети использована модель переноса по потоку:

$$\sum_{l \in u_i} \nabla_{il} x_l = q_i^c, i \in N; \quad (10)$$

$$x_l = u_l \eta_i, l \in O_i(u) \neq 0, i \in N,$$

где η_i – функция состояния узла, u_l – несущий поток, q_i^c – источник соответствующей характеристики в узле.

Средняя температура газа в ветви газохода зависит от площади его наружной поверхности, скорости потока и температуры окружающей среды и вычисляется по формуле:

$$t_l = t_{wal} + \frac{|u_l C_p|}{\lambda F} (t_{out(u_l)} - t_{wal}) \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{\lambda F}{|u_l C_p|} \right] \right\}, \quad (11)$$

Здесь t_{wal} и $t_{out(u_l)}$ – соответственно, температура окружающей среды и газа на входе в ветвь газохода; u_l – массовый расход газа; C_p – теплоемкость газа при постоянном давлении; λ – коэффициент теплопроводности стенки газохода; F – площадь наружной поверхности газохода.

Функциональная зависимость от температуры появляется в связи с изменением плотности газа, и как следствие, изменением скорости потока.

На электролизерах силой тока 130 кА эксплуатируется ГСК, конструкция которых имеет трапециевидную конфигурацию, поперечное сечение площадью 0,05 м² и эквивалентный диаметр 0,30...0,32 м. В случае применения таких ГСК в современных электролизерах с самообжигающимся анодом силой тока 170...175 кА и объемом образующихся анодных газов достигающих 42...45 нм³/ч, скорость газового потока в подколольном пространстве возрастает в 1,5...2 раза, а его сопротивление – более чем в 2 раза. Согласно данным Л. Шиллера и И. Никурадзе, обусловлено это тем, что в углах трапеции наблюдаются сравнительно высокие скорости, что является следствием образования в них вторичных течений, которые непрерывно переносят импульсы из середины течения в углы, увеличивая сопротивление трением. Снижение сопротивления возможно путем изменения конфигурации поперечного сечения подколольного пространства на параболоидную и увеличения его объема в 1,5...2 раза. Расчеты показывают, что такая модификация исключает образование вторичных течений, обеспечивает равномерное течение потока и, в соответствии с законом Блазиуса, снижение сопротивления в 3...4 раза.

Для практического использования разработаны и защищены патентами РФ ряд конструкций ГСК (патенты РФ №№ 2324012; 95669; 2399697), обеспечивающие эффективность сбора анодных газов на уровне 94...96 %, и сокращение удельных выбросов фторидов на 0,7...0,8 кг/т Al.

При моделировании процесса горения в качестве базовой взята щелевая горелка объемом 70 дм³, как наиболее массовая из эксплуатируемых на алюминиевых заводах. Недостаток горелок этого типа – неравномерность скоростей потока и температур в зоне горения (рис. 8), что вызывает недожог СО, выброс которого из горелки составляет 0,102 г/с.

Для выравнивания скоростей потока разработана конструкция горелки с воздухозаборными щелями переменной площади (патент РФ № 2456383), в которой обеспечивается близкое к ламинарному режиму течение и равномерное поле разрежений. Однако в горелке наблюдается неравномерность полей температур. При этом температуры, необходимые для дожигания смолистых веществ (1270 °С и более), наблюдаются лишь в локальных зонах, что является следствием низкой эффективности смешивания сжигаемых газов с воздухом, так как при течении потока вдоль гладкой стенки длина пути перемешивания близка к нулю.

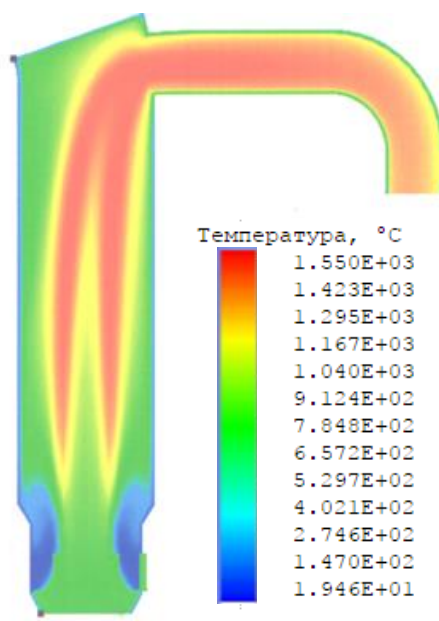


Рис. 8 – Поле температур в щелевой горелке

Для решения проблемы качественного смешивания сжигаемого анодного газа с воздухом проведены исследования, разработаны и запатентованы конструкции горелок с завихрителями (патенты РФ №№ 2456380; 164940). Предложена также конструкция горелки с дисковыми поворотными турбулизаторами, позволяющими регулировать разрежение в зоне горения (рис. 9). Турбулизаторы обеспечивают турбулентный режим течения в горелке, увеличивают путь смешивания сжигаемых анодных газов с воздухом и распространение пламени по всему сечению горелки при сохранении равномерности распределения разрежения в зоне горения, где при $\alpha = 1,2$ преобладают температуры от 1200 до 1300 °С (рис. 10).

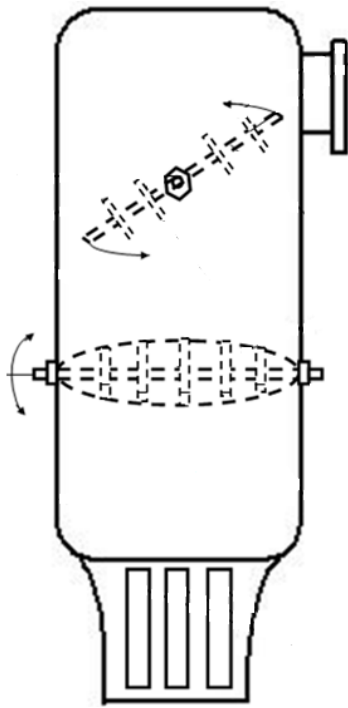


Рис. 9 – Горелка с дисковыми регуляторами-турбулизаторами разрежения

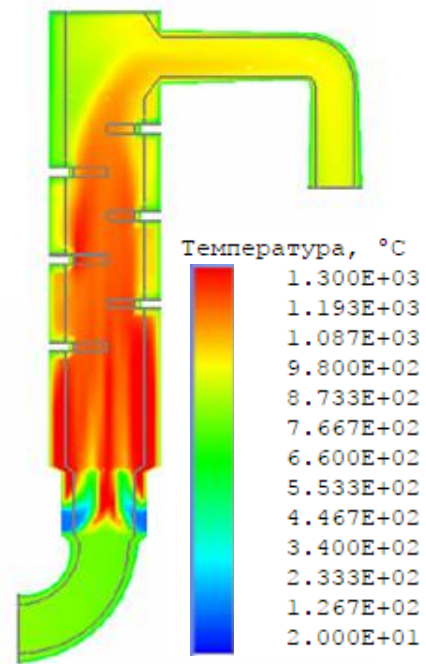


Рис. 10 – Распределение температур в горелке с турбулизаторами

Необходимые объем горелки и время нахождения сжигаемых компонентов в зоне высоких температур определены по эмпирическим зависимостям:

$$\tau_{sj} = 25 \left(1 - \frac{t_{ст}}{1060} \right), \quad (12)$$

$$V_K = \frac{\sum_{i=1}^N W_i Q_i}{q_v}, \quad (13)$$

где $t_{ст}$ – температура в зоне горения; W_i – расход горючих компонентов анодного газа; Q_i – теплота сгорания горючих компонентов анодного газа; q_v – допустимое тепловое напряжение топочного объема; N – количество видов горючих компонентов анодного газа.

Из зависимостей (12) и (13) следует, что для электролизера силой тока 170...175 кА объем горелки должен составлять 100...105 дм³, время нахождения сжигаемых анодных газов в зоне высоких температур – не менее 1 с, что достигается увеличением диаметра горелки с 325 до 420 мм при избытке воздуха $\alpha = 1,2$.

Замер параметров работы существующей газоходной сети корпуса электролиза (рис. 11), показал отчетливую тенденцию уменьшения разрежения и роста температур в горелках по мере их удаления от источника разрежения. Так, наиболее близкие и удаленные от этих источников горелки эксплуатируются с избытком воздуха $\alpha = 5...5,6$ и $\alpha = 2,8...3,0$ соответственно. При этом не наблюдаются температуры, необходимой для устойчивого сгорания смолистых веществ (более 1270 °C).

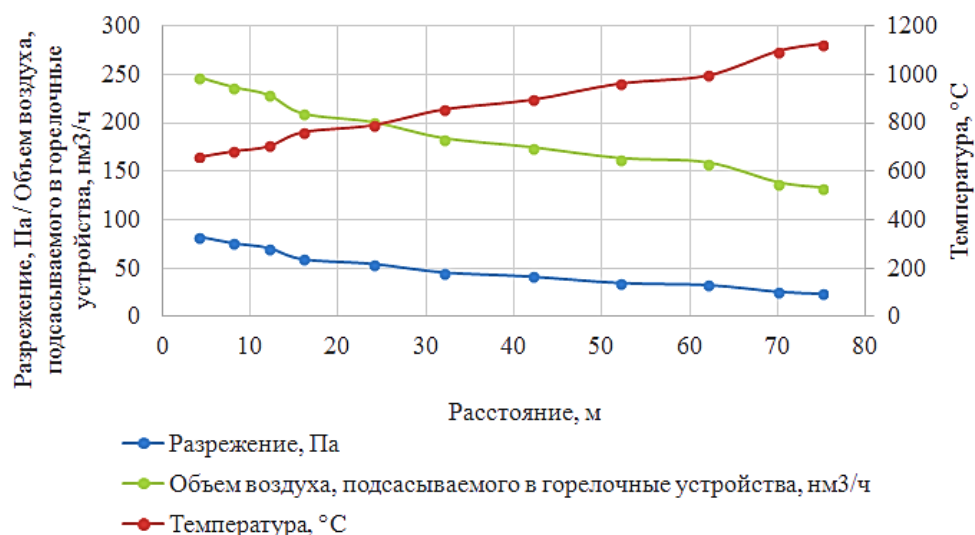


Рис. 11 – Усредненные параметры работы существующей газоходной сети

Для решения этих проблем предложены мероприятия по модернизации газоходной сети: использование тройников улучшенной формы, исключение пылеосадительных камер и несанкционированных присосов воздуха, регулирование разрежения в сети и увеличение скорости потока до 15 м/с при обеспечении избытка воздуха $\alpha=1,05\dots1,2$. Результаты моделирования газоходной сети, включающей предложенные технические решения (рис. 12), показывают, что разность разрежений в горелках не превышает 10 %, температура в них $\geq 1270\text{ }^{\circ}\text{C}$, суммарный объем воздуха, подсасываемого в горелки, снижен более чем в 2 раза, с 7600 до 3700 нм³/ч.

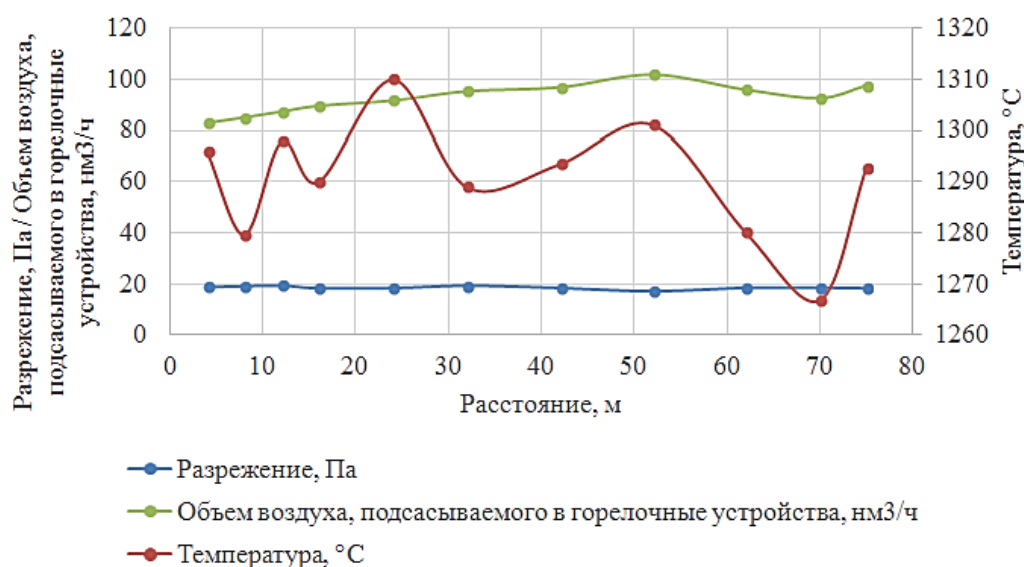


Рис. 12 – Усредненные параметры работы «скоростной» газоходной сети с регулированием разрежения в горелках

Таким образом, за счет снижения объема газоудаления, энергетические затраты на транспортировку анодных газов сокращаются на 20...25 %, материалоемкость газоходной сети, за счет уменьшения диаметров газоходов и исключения пылеосадительных камер в масштабе Красноярского алюминиевого завода – более чем на 600 т.

С целью сокращения энергетических затрат на удаление из газоходных сетей пылевых отложений предложена закрутка потока сжатого воздуха, вводимого в газоход. Для расчета оптимальных параметров крутки использовалась математическая модель движения пылевых частиц в закрученном потоке. При закрутке, вследствие наличия тангенциальной составляющей скорости, сила сопротивления частицы при ее обтекании газовым потоком значительно ниже, чем при осевом течении и определяется выражением:

$$F_{\mu=c_X} \cdot \omega \cdot \frac{\rho_0 u^2}{2}, \quad (14)$$

$$F_{\mu=c_X} \cdot \omega \cdot \frac{\rho_0 \cdot (u_{\text{тст}} - v_{\tau})^2}{2}, \quad (15)$$

где c_X – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; ω – площадь среднего сечения частицы; ρ_0 – плотность газа; u – скорость газового потока; $u_{\text{тст}}$ – тангенциальная составляющая скорости газового потока в пристенной зоне; V_{τ} – тангенциальная скорость частицы.

При эксплуатации газоходных сетей корпусов производства алюминия оптимальной является слабая закрутка, которая обеспечивается вводом в газоход потока сжатого воздуха под углом от 36 до 48°.

В пятой главе выполнена оценка влияния балластных газовых и пылевых примесей анодных газов на эффективность работы горелки и дожигания анодных газов.

Согласно технологическому регламенту, горелки дожигания анодного газа эксплуатируются с избытком воздуха $\alpha = 6$. При такой величине α содержание балластных газовых примесей (CO_2 и N_2) в зоне горения может достигать 93 %, что затрудняет работу горелки вследствие ее охлаждения подсасываемым воздухом и разбавления концентрации горючих компонентов до уровня, недостаточного для поддержания горения. Определены калориметрическая температура горения анодного газа при различных температурах подсасываемого в горелку воздуха, а также концентрационные пределы воспламеняемости содержащих балластные примеси сложных горючих газов по следующим соотношениям:

$$L_B = \frac{L_G \left[1 + \frac{B}{(1-B)} 100 \right]}{\frac{100 + L_G B}{1-B}}, \quad (16)$$

$$L_{\Gamma} = \frac{(r_{CO} + r_{H_2} + r_{CH_4})}{\frac{r_{CO}}{l_{CO}} + \frac{r_{H_2}}{l_{H_2}} + \frac{r_{CH_4}}{l_{CH_4}}}, \quad (17)$$

где L_B и L_{Γ} – нижний или верхний концентрационные пределы воспламеняемости сложных горючих газов соответственно, содержащих и не содержащих балластные примеси; B – количество балластных примесей; r_{CO} , r_{H_2} , r_{CH_4} – содержание CO, H₂ и CH₄ в сжигаемых анодных газах; l_{CO} , l_{H_2} , l_{CH_4} – нижние или верхние концентрационные пределы их воспламеняемости.

Установлено влияние объемов анодных газов и воздуха, поступающих в горелку на скорость потока, температуру и время их нахождения в зоне горения. Выявлено, что при $\alpha \geq 3,5$ концентрация горючих компонентов в сжигаемых анодных газах становится меньше нижнего концентрационного предела воспламеняемости, а температура в зоне горения достигает уровня, недостаточного для воспламеняемости основного газового компонента сжигаемой смеси – оксида углерода (рис. 13).

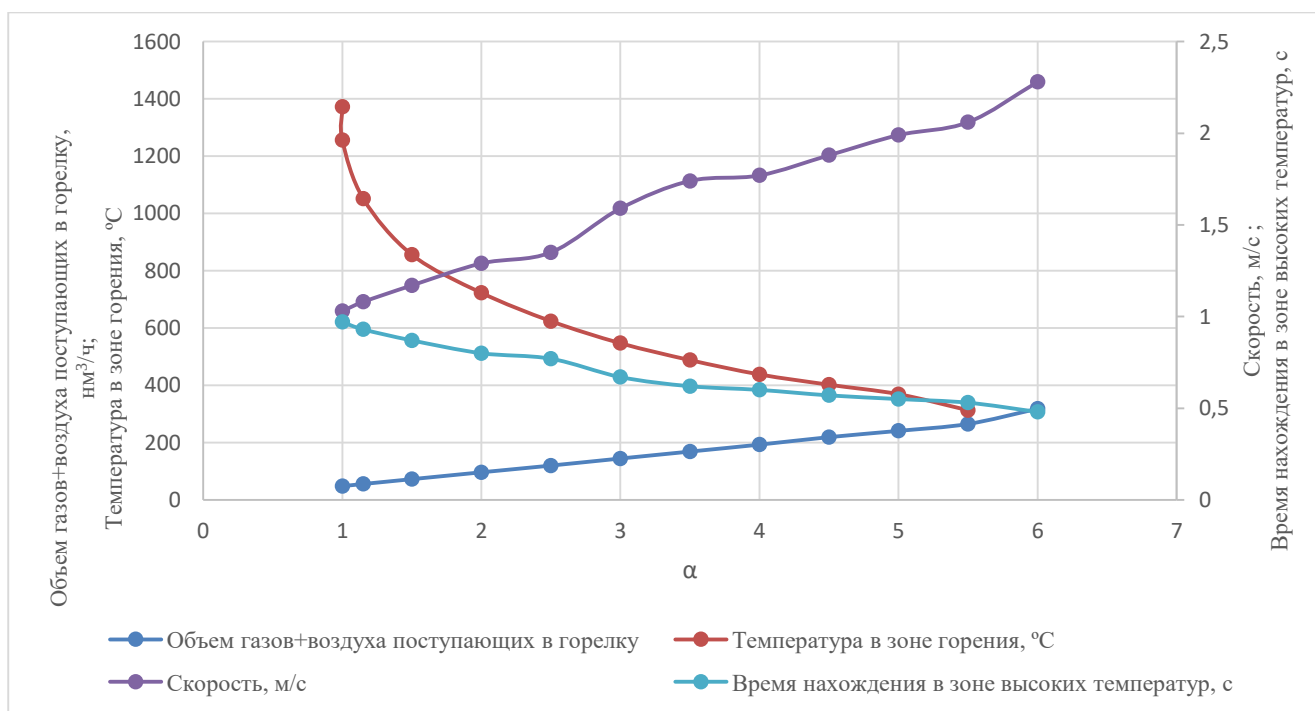


Рис. 13 – Влияние коэффициента избытка воздуха α на скорость потока в горелке, объем сжигаемой газовой смеси, температуру и время ее нахождения в зоне горения

Проведена оценка влияния коагуляции и седиментации пылевых частиц на устойчивость работы горелок. Пылевые балластные примеси представлены, преимущественно, частицами размером от 2 до 30 мкм. Их средняя концентрация в анодных газах, поступающих из-под ГСК в горелку, составляет 35 г/м³. Исследования показывают, что частицы коагулируют, образуя конгломераты размером до 400 мкм и более.

Рассмотрены три вида коагуляции: тепловая за счет броуновского движения, вызванного взаимодействием частиц с молекулами высокотемпературной газовой среды; турбулентная, вызванная пульсациями газовой среды и частиц; кинетическая (гравитационная), вызванная градиентом скорости частиц под действием силы тяжести.

Количество частиц, соприкасающихся под действием теплового движения за время τ , зависит от расстояния, на котором эти частицы находятся от центра поглощающей среды, и может быть представлено в виде: (18)

$$\Phi_{\text{тепл}} = 4\pi r D n \left(\tau + \frac{4r\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi D}} \right), \quad (18)$$

где n – счетная концентрация аэрозоля; r – радиус пылевых частиц; D – коэффициент молекулярной диффузии коллоидных (пылевых частиц), определяемый по уравнению Эйнштейна и зависящий от температуры и коэффициента трения коллоидной частицы о вещество дисперсной среды.

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

$$\Phi_{\Gamma} = 4 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} r^3 n_0, \quad (19)$$

где n_0 – начальная концентрация аэрозоля (счетная концентрация аэрозоля); ε – скорость диссипации кинетической энергии; ν – кинематическая вязкость газовой среды.

В соответствии с зависимостью (19) 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 с различными размерами и скоростями движения сопровождается их кинематической (гравитационной) коагуляцией. Число мелких частиц, захваченных в 1 с крупной частицей с радиусом R можно определить по формуле:

$$\Phi_{\Gamma} = \pi \Theta R^2 V_{\delta}, \quad (20)$$

где Θ – коэффициент захвата (осаждения), определяемый согласно стоксовского закона сопротивления частицы в среде; R – радиус конгломерата; V_{δ} – скорость движения пылегазовой смеси (аэрозоля).

Влияние избытка воздуха, температуры в зоне горения и размеров пылевых конгломератов на скорость их седиментации, а также скорость газового потока в горелке представлены на рис.14 и 15.

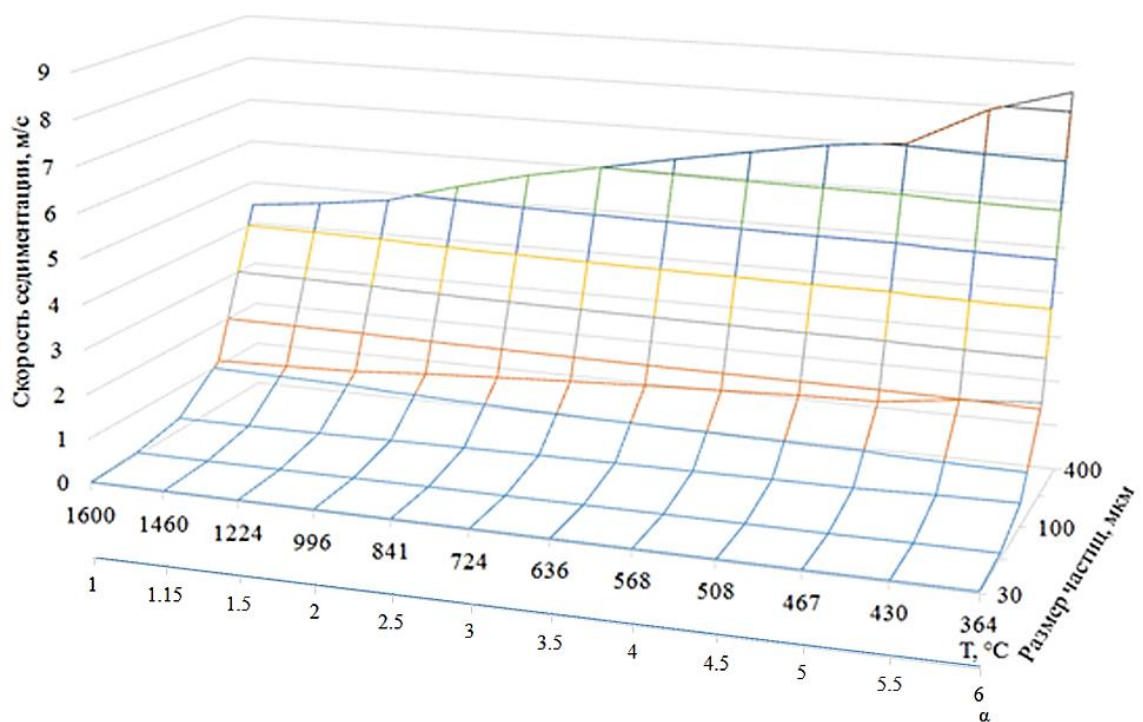


Рис. 14 – Влияние избытка воздуха α , температуры в зоне горения T и размеров пылевых конгломератов на скорость их седиментации

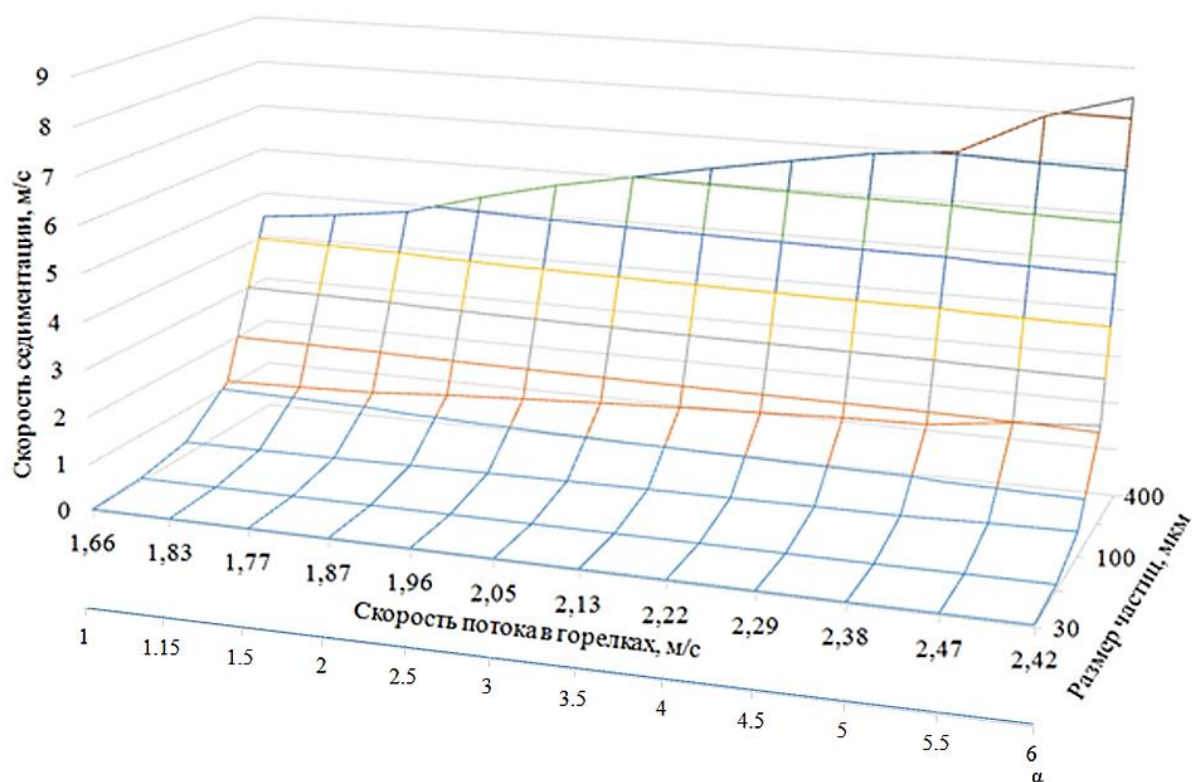


Рис. 15 – Влияние избытка воздуха α на скорости газового потока и седиментации пылевых конгломератов в горелке

Из рис. 14 видно, что в работающей горелке скорость седиментации пылевых конгломератов ниже, чем в погасшей. Это обусловлено ростом вязкости газовой фазы при увеличении ее температуры и, соответственно, более быстрым достижением критической концен-

трации конгломератов, приводящей к погасанию горения. Установлено, что скорость седиментации частиц размером 400 мкм превышает скорость потока, а частиц размером 200 мкм - близка к скорости потока при любых значениях α (см. рис. 15). Таким образом, можно предположить, что в горелке во взвешенном состоянии находятся конгломераты размером от 200 до 300 мкм, химический состав которых на 70 % представлен ингибирующими компонентами – глиноземом и фтористыми солями. Согласно выполненным расчетам, характерное время достижения критической концентрации конгломератов, приводящей к погасанию горения, составляет 3,5...6,5 ч., что хорошо согласуется 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 системой импульсной очистки горелок от пылевых отложений, утилизирующей сжатый осушенный воздух, отработанный системой АПГ (патент РФ № 2437966). Импульсы сжатого воздуха, за счет действия дополнительной силы, связанной с относительным ускорением среды вокруг частицы, и 4...5-кратного кратковременного роста давления в течение 0,5...1,0 с, захватывают и уносят конгломераты в систему газоудаления.

В шестой главе представлены результаты экспериментальной оценки разработанных технических и технологических решений.

Испытания системы автоматической импульсной очистки горелок от отложений выполнены в период ноябрь 2006 – апрель 2007 года на горелочных устройствах электролизеров №№ 510; 511; 543 Красноярского алюминиевого завода. В период испытаний отложения в испытуемых горелках не образовывались, их чистка вручную не производилась. Время, в течение которого температура газов на выходе из испытуемого горелочного устройства превышала 600 °С (температура, при которой наблюдается устойчивое горение), более в 7 раз превышало время, в течение которого такая же температура наблюдалась на выходе из «рядовых» горелок. Также на испытуемых горелках достигнуто увеличение степени сгорания углеродной составляющей пыли, поступающей с анодными газами в зону горения: содержание углерода в пыли после «рядовой» и испытуемой горелок уменьшилось практически в 2,9 раза (с 28,2 до 9,8 % масс.).

Таким образом, эксплуатация системы снижает вынос пыли в систему организованного газоудаления на 15...20 %, в три раза уменьшает количество углерода, возвращаемого в электролизер с фторированным глиноземом, на 1...2 % снижает пылевую нагрузку на рукавные фильтры и частоту их регенерации сжатым воздухом, увеличивает срок службы рукавов. Съем пены с электролизера снижается на 4...5 кг/т Al. Количество пены, перерабатываемой на участках флотации Красноярского и Братского алюминиевых заводов, сокращается соот-

ветственно на 42 и 50 тыс. т/год, количество углерода, складываемого на шламохранилищах в виде хвостов флотации, – на 17 и 20 тыс. т/год.

Опытно-промышленные испытания теплоизолированного ГСК показали, что в расчете на тонну алюминия суммарные потери теплоты через его поверхность снижаются примерно в два раза (от 30...35 до 17 кВт), а удельный расход электроэнергии на компенсацию этих потерь сокращается на 130...150 кВт·ч.

Эксперименты с регулированием разрежения в горелке выполнены на электролизерах №№ 94; 95; 96 корпуса № 25 Братского алюминиевого завода в два этапа, в периоды 15.11 – 17.11 и 07.12 – 20.12.2006 г. Установлено, что при разрежении в диапазоне 20...22 Па температура в зоне горения возрастает на 50 °С и более. При этом выбросы из горелки СО, смолистых веществ, бенз(а)пирена и пыли снижаются соответственно в 4,2; 3,5; 4,3 и 2,1 раза.

Опытно-промышленные испытания и оценка эффективности загрузки в расплав предварительно нагретого глинозема проводилась на электролизере № 1265 Красноярского алюминиевого завода. В результате испытаний выявлено, что увеличение температуры глинозема на каждые 50 °С снижает падение температуры электролита в среднем на 2 °С и сокращает удельный расход электроэнергии на 20 кВт·ч/т Al. При нагреве глинозема до 200...250 °С снижение удельного расхода электроэнергии составляет 80...110 кВт·ч/т Al, время его полного растворения в электролите снижается в 1,7 раз.

Экспериментальные исследования параметров дожигания основных компонентов смолистых веществ – нафталина и антрацена, содержащихся в сжигаемых анодных газах, показали, что в воздушной среде полное их сгорание происходит при температуре ≥ 750 °С и времени нахождения в зоне горения соответственно $\geq 0,5$ и 0,2 с (рис. 16 и 17).

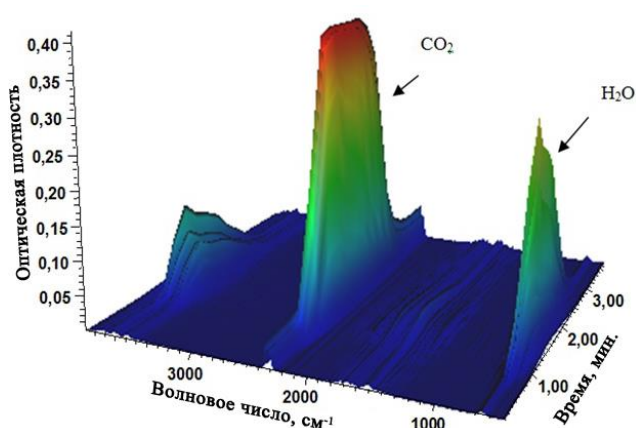


Рис. 16 – Состав продуктов горения нафталина при 750 °С и времени нахождения в зоне горения в течение 0,5 с

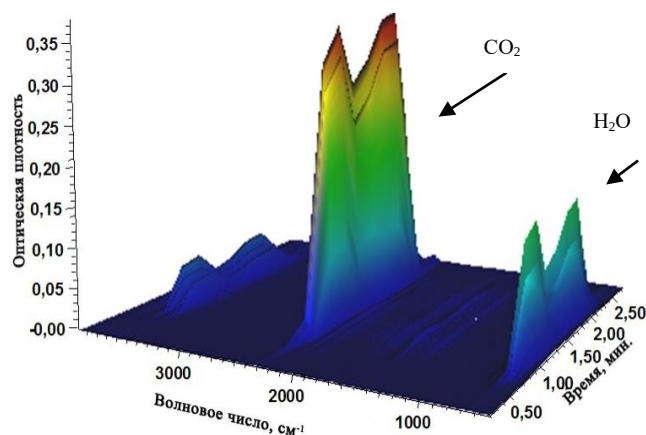


Рис. 17 – Состав продуктов горения антрацена при 750 °С и времени нахождения в зоне горения в течение 0,2 с

Экспериментальные исследования по сжиганию нафталина и антрацена в инертной среде аргона (моделировались условия недостатка воздуха) показали, что в этом случае происходит их пиролиз с образованием горючих этилена, метана, ацетилена, сажи и собственно возгонов исходных веществ (рис. 18 и 19).

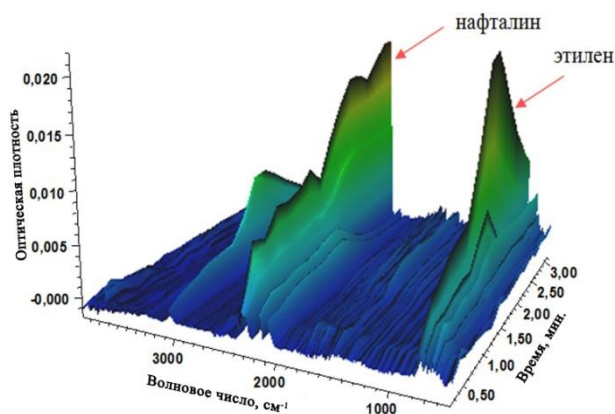


Рис. 18 – Состав продуктов горения нафталина в аргоне при 900 °С и времени нахождения в зоне горения в течение 0,9 с

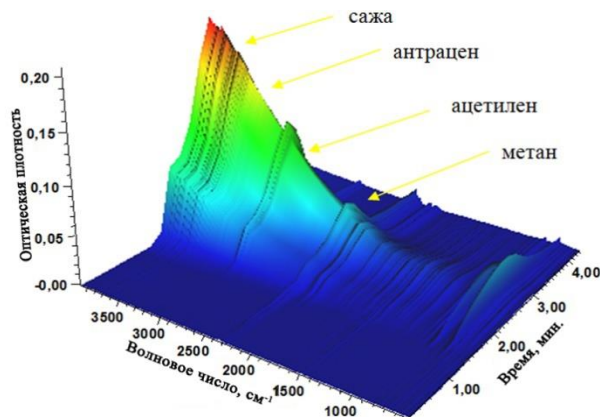


Рис. 19 – Состав продуктов горения антрацена при 900 °С и времени нахождения в зоне горения в течение 0,9 с

В седьмой главе выполнена общая укрупненная оценка энергетической, экологической и экономической эффективности результатов исследований и внедрения их в производство. Показано, что внедрение результатов работы обеспечивает снижение на одну тонну алюминия удельной металлоемкости технологического процесса производства алюминия до 0,0027 кг, удельного расхода электроэнергии в среднем на 900 кВт·ч. При этом достигается следующее сокращение удельных выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду: газообразных соединений фтора – 0,20, твердых соединений фтора – 0,28, смолистых веществ (по нафталину – 0,55, бенз(а)пирена – 0,00088, оксида углерода – 44,7, диоксида серы – 0,55, пыли неорганической с содержанием SiO_2 до 20 % – 0,77.

Суммарный ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных технических и технологических мероприятий заключается в снижении себестоимости производимого металла на 2289,8 руб./т Al.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны научно обоснованные технические и технологические решения по совершенствованию теплоиспользующих установок получения первичного алюминия и повышению их экологических характеристик. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработаны научно обоснованные технические и технологические решения повышения энергетической эффективности алюминиевых электролизеров, обеспечивающие уменьшение потерь теплоты поверхностями электролизера, нагрев глинозема утилизируемой теплотой анодных газов, снижение толщины образующегося в результате окисления анода прианодного газоелектролитного слоя, сокращение расхода электроэнергии на 800...1000 кВт·ч/т Al, количество эксплуатируемых горелок и бункеров системы АПГ в два раза, нагрузки на домкраты анодной рамы на 6...8 т.

2. Разработаны научно обоснованные технические и технологические решения повышения экологической безопасности алюминиевых электролизеров путем 1,5...2-кратного расширения объема подколокольного пространства ГСК, увеличения пути смешивания сжигаемых анодных газов с воздухом и времени их нахождения в зоне горения, обеспечения равномерности распределения разрежения и пламени по всему сечению горелки, оптимизации избытка воздуха α , обеспечивающим снижение частоты забивания подколокольного пространства оплесами и отложениями в 3...4 раза, увеличение температуры в зоне горения до 1230 °С и выше, уменьшение площади открытой криолит-глиноземной корки электролизера на 15...20 %, снижение на одну тонну алюминия удельных выбросов фторидов на 0,7...0,8 кг, СО в 4,2 раза, смолистых веществ в 2,9 раза, бенз(а)пирена в 6 раз, сокращение материалоемкости газоходной сети в среднем на 30 %, аэродинамического сопротивления системы газоудаления на 25...30 %.

3. Разработана методология теплотехнического расчета системы газоудаления электролизера с самообжигающимся анодом, позволяющая дать комплексную оценку влияния геометрических параметров ГСК, горелок и газоходной сети и режимных параметров их работы на эффективность и эксплуатационную надежность системы в условиях увеличения силы тока в процессе электролиза.

4. На основе теоретических и экспериментальных исследований получены новые данные по условиям дожигания нафталина и антрацена – основных компонентов смолистых веществ, содержащихся в анодных газах. Установлено, что температура воспламенения нафталина и антрацена составляет 300 и 400 °С, а полное их сгорание достигается при температуре ≥ 750 °С в течение $\geq 0,5$ и 0,2 с соответственно. Выявлено, что при сжигании нафталина и антрацена в условиях недостатка воздуха происходит их испарение и пиролиз с образованием этилена, метана, ацетилена, сажи.

5. На основе анализа результатов математического моделирования установлены температурно-временные, концентрационные и аэродинамические зависимости влияния газовых и пылевых балластных примесей сжигаемого анодного газа на устойчивость работы горелки:

– выявлено, что при избытке воздуха $\alpha \geq 3,5$ уровень температуры в зоне горения ($< 550\text{ }^{\circ}\text{C}$) и концентрации горючих компонентов (7,2 % об.) является недостаточным для поддержания воспламенения анодных газов, в результате чего горение поддерживается за счет входящих в их состав смолистых веществ – нафталина и антрацена;

– выявлено, 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 и снижает время седиментации частицы;

– установлено, что критическая концентрация пыли в зоне горения, приводящая к погасанию горелки достигается в течение 3,5...6,5 ч;

– разработаны диаграммы, позволяющие оценить влияние избытка воздуха α , температуры и скорости потока в зоне горения, вязкости газовой смеси и размеров частиц пыли на образование конгломератов и скорость их седиментации;

– разработан алгоритм автоматической очистки полости горелки от отложений импульсами сжатого воздуха, предотвращающий рост концентрации пыли в зоне горения.

6. Изучено влияние температуры загружаемого в электролизер глинозема на скорость его растворения и колебания температуры электролита. Установлено, что нагрев глинозема на каждые $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижает падение температуры электролита на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сокращает удельный расход электроэнергии на $20\text{ кВт}\cdot\text{ч/т Al}$. При нагреве глинозема до $200\text{...}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижение удельного расхода электроэнергии составляет $80\text{...}110\text{ кВт}\cdot\text{ч/т Al}$, время его полного растворения в электролите снижается в 1,7 раз.

7. Разработаны диаграммы и таблицы процесса дожигания анодных газов, позволяющие определить температуру в зоне горения, верхние и нижние пределы воспламеняемости сжигаемой смеси, время нахождения сжигаемой смеси в зоне высоких температур при изменении избытка воздуха α в диапазоне от 1 до 6 и объема горелки от 70 до $100\text{...}105\text{ дм}^3$.

8. Разработаны новые способы и устройства снижения потребления электроэнергии электролизером, улавливания и обезвреживания вредностей, выделяющихся при производстве алюминия.

Внедрение результатов работы обеспечивает снижение на одну тонну алюминия удельной металлоемкости технологического процесса производства алюминия до $0,0027\text{ кг}$, удельного расхода электроэнергии в среднем на $900\text{ кВт}\cdot\text{ч}$. При этом достигается следующее сокращение удельных выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду: газообразных соединений фтора – 0,20, твердых соединений фтора – 0,28, смолистых веществ (по нафталину – 0,55, бенз(а)пирена – 0,00088, оксида углерода – 44,7, диоксида серы – 0,55, пыли неорганической с содержанием SiO_2 до 20 % – 0,77.

Суммарный ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных технических и технологических мероприятий заключается в снижении себестоимости производимого металла на 2289,8 руб./т Al.

9. Результаты работы используются в учебном процессе Сибирского Федерального университета при подготовке бакалавров и магистров по специальностям, включающим дисциплины «Промышленная теплоэнергетика», «Промышленная экология» и «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», а также в курсах, организуемых для повышения квалификации работников алюминиевых заводов России.

Научные результаты работы отражены в следующих основных публикациях:

Монографии:

1. **Шахрай С.Г.** Совершенствование систем колокольного газоотсоса на мощных электролизерах Содерберга / **С. Г. Шахрай**, В. В. Коростовенко, И. И. Ребрик – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. – 146 с.
2. **Шахрай С.Г.** Энерго- и ресурсосбережение в производстве алюминия / **С.Г. Шахрай**, В.В. Кондратьев, А.В. Белянин - Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2014. – 160 с.

Публикации в ведущих рецензируемых журналах, входящих в базу данных Scopus:

3. Ультразвук. Возможности и перспективы применения в алюминиевой промышленности / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, А.Н. Баранов // Цветные металлы» - 2010. – №8. - с. 43 - 47
4. Совершенствование системы сбора, эвакуации и обезвреживания анодных газов на мощных электролизерах Содерберга / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, С.В. Голдаев // Цветные металлы. – 2010. – № 11. – С.54–57.
5. Effect of Deposits in the Sub-bell space of S-8 and S-8BM Electrolysis cells on the Environmental indices of the electrolysis operation / **S.G. Shakhrai**, V.V. Kondratiev, and E.V. Budnik. // Metallurgist – 2012. – Vol. 56, Nos. 9-10, January.– P.P.700-704.
6. Reduction of emission of resinous substances during the electrolytic production of aluminum / **S.G. Shakhrai**, V.V. Korostovenko // Russian Journal of Non-Ferros Metals. Volume 54, Issue 1, 2013, p. 76-78.
7. Improving the Energy Efficiency of a Top-Worked Electrolysis Cell / **S.G. Shakhrai**, V. V. Kondrat'ev, A. V. Belyanin // Metallurgist, Vol. 58, Nos. 1-2, May, 2014. – p.p.138-142.

8. Improving the Energy Efficiency of a Top-Worked Electrolysis Cell / **S.G. Shakhrai**, V.V. Kondratiev, A.V. Belyanin and [etc.] // Metallurgist. – 2014. – Vol. 58, Nos. 1-2, May. – P.P. 138–142.
9. Снижение омических потерь напряжения на газосодержащем слое электролита электролизера с самообжигающимся анодом / **С.Г. Шахрай**, В.В. Кондратьев, А.В. Белянин [и др.] // Цветные металлы. – 2014. – № 8. – С. 46–49.
10. Предварительный нагрев обожженного анода / В.В. Кондратьев, В.А. Ершов, **С.Г. Шахрай** [и др.] // Цветные металлы. – 2015. – № 1. – С. 54–56.
11. Increasing the Efficiency of the Impregnation of Coke with Pitch in the Production of Anode Paste for Aluminum Cells / **S.G. Shakhrai**, N.A. Sharypov, A.V. Belyanin // Metallurgist, Vol. 58, Nos. 11-12, March, 2015. – p.p.1046-1048.
12. Anode Mass Cover as an Aluminum Electrolyzer Subsystem / **S.G. Shakhrai**, P.V. Polyakov, G.V. Arkhipov and [etc.]. // Metallurgist, Vol. 58, Nos. 11-12, March, 2015. – p.p.1128-1135.
13. Cooling of the Anode Gases of Aluminum Reduction Cells in Alumina-Heating Heat Exchangers / **S.G. Shakhrai**, V.V. Kondrat'ev, A.V. Belyanin and [etc.] // Metallurgist. – 2015. – Vol. 59, Nos. 1-2, May. – p.p. 126–127.
14. Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, А.П. Скуратов, В.В. Кондратьев и [др.]. // Цветные металлы. – 2016. – № 2. – С. 52–56.
15. Исследование свойств укрывных материалов обожженных анодов алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, П.В. Поляков, А.М. Иванова и [др.]. // Цветные металлы. 2016- №1, с. 39-44.
16. Разработка способа управления энергетическим режимом электролизеров для производства алюминия / И.А. Сысоев, В.В. Кондратьев, **С.Г. Шахрай** и [др.]. // Цветные металлы. – 2016. - №5. - С. 38-43.
17. Оценка влияния коагуляции и седиментации пылевых частиц на устойчивость работы горелок алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, А.А. Дектерев, А.П. Скуратов [и др.]. // Цветные металлы. – 2017. – № 6 – С. 53–58.
18. Комплексный теплотехнический расчет системы газоудаления электролизера с самообжигающимся анодом / **С.Г. Шахрай**, А.П. Скуратов, А.А. Дектерев и [др.]. Цветные металлы. – 2017. – № 7. – С. 48–54.
19. Engineering Solutions for Cooling Aluminum Electrolyzer Exhaust Gases / **S.G. Shakhrai**, N.V. Nemchinova, V.V. Kondrat'ev // Metallurgist. January 2017, Volume 60, Issue 9, pp 973–977.

Публикации в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

20. Динамика газодисперсного потока в вертикальном канале / Е.В. Сугак, Е.В. Кузнецов, **С.Г. Шахрай** // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2005. – Вып.7. – С.18–23.
21. Расчетная модель очистки газоходов от пылевых отложений закрученным потоком / А.Н. Баранов, **С.Г. Шахрай** // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2008. - № 4. - С.87–90.
22. Повышение эффективности работы щелевых горелочных устройств алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, А.Н. Баранов, И.И. Ребрик и [др.]. // Системы. Методы, Технологии: научный периодический журнал. - Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009, №2. - с. 94-97.
23. Совершенствование системы сбора газов, образующихся на электролизерах с самообжигающимся анодом и верхним токоподводом / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, И.И. Ребрик // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 2. – С.35–39.
24. Снижение выбросов фтористых солей при охлаждении анодных огарков алюминиевого электролизера / А.Н. Баранов, **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко // Системы. Методы, Технологии: научный периодический журнал. - Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010, №2(6) –с. 136-139.
25. О повышении эффективности очистки газов от прокалочных комплексов нефтяного кокса / **С.Г. Шахрай**, А.Д. Арнаутов, И.И. Лапаев и [др.]. // Экология и промышленность России - 2010 - №7. – с. 7-9.
26. Модернизация системы сбора и обезвреживания электролизных газов / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, А.Н. Баранов, [др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2010. – № 4. – С.151–162.
27. Исследования и разработка предложений по оптимизации аэродинамических параметров систем газоудаления от электролизеров Кандалакшского и Богословского алюминиевых заводов / В.В. Кондратьев, **С.Г. Шахрай** // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2011, № 6. – С. 91 – 98.
28. Моделирование газоходных сетей корпусов производства алюминия с целью выравнивания объемов газоотсоса от электролизеров / **С.Г. Шахрай**, А.Н. Баранов, В.В. Коростовенко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 11. – С.182–185.
29. Влияние повышения силы тока электролизера на санитарно-гигиенические показатели атмосферы корпуса производства алюминия / **С.Г. Шахрай**, А.Н. Баранов, В.В. Ко-

ростовенко // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2011. - № 12. – С. 210 - 215

30. Технические решения по утилизации тепла и улавливанию вредных выбросов при охлаждении анодного огарка / Е.И. Жуков, М.В. Винокуров, **С.Г. Шахрай**, [др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 12. – С.196–199.

31. Санитарно-гигиеническая оценка воздуха рабочей зоны корпуса производства алюминия, оснащенного электролизерами с предварительно обожженными анодами / Е.И. Жуков, В.В. Коростовенко, **С.Г. Шахрай** и [др.]. // Экология и промышленность России - 2012. - №5г. – С. 9-11.

32. Повышение эффективности газоулавливания в рабочей зоне электролизеров с предварительно обожженными анодами с силой тока свыше 300 кА / В.В. Кондратьев, **С.Г. Шахрай**, Е.И. Жуков и [др.]. // Экология и промышленность России. – 2012. – № 7. – С. 8–11.

33. Влияние отложений в подколольном пространстве электролизеров С-8; С-8БМ на экологические показатели процесса электролиза / **С.Г. Шахрай**, В.В. Кондратьев, Е.В. Будник // Metallurg. - 2012 - №9. – с. 77-80.

34. Сокращение выбросов смолистых веществ при электролитическом производстве алюминия / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко // Известия Вузов. Цветная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 60–63.

35. Современное состояние атмосферы корпусов производства алюминия и методы ее нормализации / **С.Г. Шахрай** // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия «Техника и технологии», т. 5. - №6, октябрь 2012. – С. 638-646.

36. Повышение энергетической эффективности электролизера с верхним токоподводом / **С.Г. Шахрай**, В.В. Кондратьев, А.В. Белянин и [др.] // Metallurg – 2014. – № 2. – С. 84–86.

37. Повышение эффективности пропитки кокса пеком при производстве анодной массы для алюминиевых электролизеров / **С.Г. Шахрай**, А.Н. Шарыпов, А.В. Белянин // Metallurg. - 2014 - №11. - С. 115-117.

38. Укрытие анодного массива как подсистема алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, П.В. Поляков, Г.В. Архипов и [др.]. // Metallurg – 2014. – № 12. – С. 84–90.

39. Охлаждение анодных газов алюминиевых электролизеров в теплообменниках нагрева глинозема / **С.Г. Шахрай**, В.В. Кондратьев, А.В. Белянин и [др.]. // Metallurg. – 2015. - №2. – С. 29-32.

40. Повышение энергетической эффективности производства алюминия снижением газонаполненности электролита / **С.Г. Шахрай**, А.П. Скуратов, А.В. Белянин и [др.] // Системы, Методы, Технологии. – 2015. – № 1. – С. 103-107.

41. Проблемы автоматической подачи глинозема и методы их решения / **С.Г. Шахрай**, А.П. Скуратов, А.В. Белянин и [др.]. // Журнал Братского государственного университета «Системы, Методы, Технологии» – 2015 - №2, с. 123-127.

42. Обоснование возможности нагрева глинозема теплом анодных газов алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, А.П. Скуратов, В.В. Кондратьев и [др.]. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 3. – С. 131–138.

43. Разработка энергосберегающих мероприятий в производстве алюминия / **С.Г. Шахрай**, В.В. Кондратьев, А.В. Белянин и [др.]. // Журнал Сибирского федерального университета, серия «Техника и технология». – 2016 – т.9. - № 6 – С.845 – 853.

44. Технические решения по охлаждению отходящих газов алюминиевых электролизеров / **С.Г. Шахрай**, Н.В. Немчинова, В.В. Кондратьев и [др.]. // Metallurg. – 2016 – № 9. – С.73–77.

Труды научно-практических конференций:

45. **Шахрай, С.Г.** Проблемы дожига анодных газов электролитического производства алюминия (тезисы). / **С.Г. Шахрай**, Е.В. Сугак // Сб. докладов пятого международного конгресса по управлению отходами и природоохранным технологиям «ВэйстТЭК – 2007». – Москва, 2007, с. 323

46. **Шахрай, С.Г.** Влияние состояния газоходов на эффективность эвакуации газов / **С.Г. Шахрай**, Э.П. Ржечицкий, В.В. Кондратьев // Сб. докл. XIV Междунар. конф. «Алюминий Сибири – 2008», Красноярск: 2008. С. 408–411.

47. **Шахрай, С.Г.** Способы повышения эффективности термического обезвреживания анодных газов в горелочных устройствах электролизера / **С.Г. Шахрай**, Е.В. Сугак, В.К. Фризоргер и [др.]. // Сб. докладов XIII международной конференции «Алюминий Сибири – 2007», Красноярск: 2007. С. 405-409.

48. **Шахрай, С.Г.** Анализ влияния повышения силы и плотности анодного тока на показатели работы электролизера Содерберга / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, А.Н. Баранов, и [др.]. // Сб. научн. докл. третьего международного конгресса «Цветные металлы – 2011». – Красноярск: 2011. С. 185 – 192.

49. **Шахрай, С.Г.** Повышение энергетической эффективности электролитического производства алюминия / **С.Г. Шахрай**, А.В. Белянин, В.В. Кондратьев // Сб. докл. VI между. Конгресса Цветные металлы-2014. С. 361-372.

50. **Шахрай, С.Г.** Укрытие анодного массива алюминиевого электролизера. Обзор современных практик зарубежных алюминиевых заводов / **С.Г. Шахрай**, П.В. Поляков, Ю.Г. Михалев и [др.]. // Сб. докл. VII межд. Конгресса Цветные металлы-2015, Красноярск: 2015, С. 160-161.

51. **Шахрай, С.Г.** Методы снижения выбросов при электролитическом производстве алюминия / **С.Г. Шахрай**, Е.В. Сугак, П.В. Смола и [др.]. // Сб. научн. статей XII Межд. конф. «Алюминий Сибири – 2006», Красноярск: 2006. С.267-272.

52. **Шахрай, С.Г.** Проблемы сбора и эвакуации газов от электролизеров Содерберга и комплексный подход к их решению / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, И.И. Ребрик // Сб. научн. докл. первого международного конгресса «Цветные металлы – 2009». – Красноярск: 2009. С. 788 – 796.

53. **Шахрай, С.Г.** Эффективность эвакуации газов от электролизеров Содерберга в зависимости от конструктивных особенностей газоходов / **С.Г. Шахрай**, Э.П. Ржечицкий // Сб. материалов VI Всерос. научн.-техн. конф., Иркутск: 2008. С. 65-67.

Евразийские патенты на изобретения:

54. Евразийский патент №020634. Горелочное устройство алюминиевого электролизера с интенсивным смешиванием компонентов / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, А.Н. Баранов [и др.].

55. Евразийский патент №021630. Устройство для сбора и эвакуации анодных газов из-под укрытия электролизера с обожженными анодами / **С.Г. Шахрай**, Е.Р. Шайдулин, В.В. Коростовенко [и др.].

56. Евразийский патент №021704. Горелочное устройство щелевого типа алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, А.Н. Баранов [и др.].

Патенты РФ на изобретения и полезные модели:

38. Пат. 2324012 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Газосборное устройство алюминиевого электролизера (варианты). / **С.Г. Шахрай**, Б.П. Куликов, А.М. Петров. и [др.]. - №2006114244/02; заявл. 26.04. 2006; опубл. 10.05.2008. – 9 с.: 3 л. ил.

39. Пат. 95669 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Газосборный колокол алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко. – №2010107679/02; заявл. 02.03.2010; опубл. 10.07.2010. – 1 с. ил.

40. Пат. 95670 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Устройство для сбора и удаления газов алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко. – 2010107682/22; заявл. 02.03.2010; опубл. 10.07.2010. – 2 с.: 1 л. ил.

41. Пат. 2397278 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Газосборное устройство алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, И.И. Лапаев и [др.]. - №2009119970; заявл. 26.05.2009; опубл. 20.08.2010. – 6 с.: 1 л. ил.
42. Пат. 2399697 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Газосборный колокол алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, И.И. Лапаев [и др.]. – №2009125977/02; заявл. 06.07.2009; опубл. 20.09.2010. – 6 с.: 2 л. ил.
43. Пат. 2437966 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Способ очистки горелочного устройства и газовой сети алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, А.В. Пузин [и др.]. - 2010142026/02; заявл. 13.10.2010; опубл. 27.12.2011. – 6 с.: 2 л. ил.
44. Пат. 2456383 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Горелочное устройство щелевого типа алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, А.Н. Баранов [и др.]. – 2011104749; заявл. 09.02.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20. – 5 с.: 1 л. ил.
45. Пат. 2456380 Российская Федерация, МПК C25C3/06. Горелочное устройство алюминиевого электролизера с интенсивным смешиванием компонентов / **С.Г. Шахрай**, В.В. Коростовенко, А.Н. Баранов [и др.]. – 2011104762; заявл. 09.02.2011; опубл. 20.07. 2012. – 5 с.: 1 л. ил.
46. Пат. 2532792 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Защита алюминиевого электролизера с верхним токоподводом / **С.Г. Шахрай**, В.Ю. Бажин, В.В. Кондратьев [и др.]. – 2013129586; заявл. 27.06.2013; опубл. 10.11. 2014. – 7 с.: 3 л. ил.
47. Пат. 2534712 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Устройство для дожигания анодных газов алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, В.Ю. Бажин, В.В. Кондратьев [и др.]. – 2013129584; заявл. 27.06.2013; опубл. 10.12.2014. – 7 с.: 3 л. ил.
48. Пат. 2542180 Российская Федерация, МПК C25C3/06. Устройство отвода газов из-под подошвы самообжигающегося анода / **С.Г. Шахрай**, П.В. Поляков, А.В. Белянин [и др.]. – 2013151258; заявл. 18.11.2013; опубл. 20.02.2015. – 7 с.: 3 л. ил.
49. Пат. 2555302 Российская Федерация, МПК C25C3/12. Электролизер для производства алюминия / **С.Г. Шахрай**, Е.Р. Шайдулин, П.В. Поляков [и др.]. – 2014110827; заявл. 20.03.2014; опубл. 10.07.2015. – 5 с.: 1 л. ил.
50. Пат. 2558813 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Способ и устройство для утилизации тепла анодных газов алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, П.В. Поляков, В.В. Кондратьев [и др.]. – 2014112131; заявл. 28.03.2014; опубл. 10.08.2015. – 6 с.: 2 л. ил.
51. Пат. 2569866 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Газосборное устройство

алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, А.П. Скуратов, В.Ю. Бажин [и др.]. – 2014127402; заявл. 04.07.2014; опубл. 27.11.2015. – 6 с.: 3 л. ил.

52. Пат. 163339 Российская Федерация, МПК C25C3/00. Устройство для дожигания анодных газов алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, А.П. Скуратов, А.В. Белянин [и др.]. – 2015151631; заявл. 01.12.2015; опубл.: 10.07.2016. – 2 с.: 1 л. ил.

53. Пат. 164940 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Горелочное устройство алюминиевого электролизера с интенсивным смешиванием компонентов / **С.Г. Шахрай**, А.П. Скуратов, А.В. Белянин [и др.]. – 2015152875; заявл. 08.12.2015; опубл. 27.09.2016. – 2 с.: 1 л. ил.

54. Пат. 2586184 Российская Федерация, МПК C25C3/10. Способ укрытия анодного массива / **С.Г. Шахрай**, П.В. Поляков, А.П. Скуратов [и др.]. – 2015103579; заявл. 03.02.2015; опубл. 10.06.2016. – 3 с.

55. Пат. 2615389 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Способ защиты обожженного анода алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, П.В. Поляков, Ю.Г. Михалев [и др.]. – 2015148448; заявл. 10.11.2015; опубл. 04.04.2017. – 7 с.: 1 л. ил.

56. Пат. 2621322 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Способ удаления анодных газов алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, Е.Л. Щеглов, В.В. Мазуренко [и др.]. – 2016106464; заявл. 24.02.2016, опубл. 02.06.2017. – 7 с.: 3 л. ил.

57. Пат. 173997 Российская Федерация, МПК C25C3/22, B08B15/02. Устройство охлаждения отходящих технологических газов металлургических производств, транспортируемых по газоходной сети / **С.Г. Шахрай**, В.В. Кондратьев, С.В. Голдаев [и др.]. – 2016143716; заявл. 07.11.2016; опубл. 25.09.2017. – 6с.: 1 л.ил.

58. Пат. 2631778 Российская Федерация, МПК C25C3/22. Устройство для дожигания анодных газов алюминиевого электролизера / **С.Г. Шахрай**, А.В. Белянин, А.П. Скуратов [и др.]. – 2016145894; заявл. 22.11.2016, опубл. 26.09.2017. – 8 с.: 3 л. ил.