

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель магистерской  
программы д-р хим. наук,  
профессор

\_\_\_\_\_ Н.В. Белоусова

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА**

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

«Поиск путей снижения негативного воздействия на окружающую среду от  
производства алюминия»

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

канд. техн. наук,

доцент

А.С. Ясинский

Консультант по  
экономической части

\_\_\_\_\_

подпись, дата

канд. экон. наук,

доцент

Т.В.

Твердохлебова

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

В.П. Савченко

Рецензент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Начальник отдела экологии

АО «РУСАЛ Саяногорск»

А.Р. Шоев

Красноярск 2020 год

## АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа по теме «Поиск путей снижения негативного воздействия на окружающую среду от производства алюминия».

Актуальность работы обусловлена нерешенными, до настоящего времени, задачами в области экологической безопасности при производстве алюминия.

Целью диссертации является поиск путей снижения негативного воздействия на окружающую среду от предприятий по производству первичного алюминия.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- изучение литературы в области выбранной проблематики;
- выбор пути снижения негативного воздействия от производства алюминия;
- изучение выбранного способа снижения негативного воздействия;
- анализ текущей ситуации на выбранном предприятии;
- разработка мероприятий, позволяющих снизить негативное воздействие производства алюминия.

В результате магистерской работы представлены мероприятия, позволяющие достичь поставленную цель и рассчитан срок окупаемости предложенных мероприятий.

Работа содержит 72 страницы текстового документа, 18 рисунков, 4 таблицы, 63 использованных источника.

Ключевые слова: производство алюминия, негативное воздействие, выбросы, аноды, бенз(а)пирен, снижение, газоочистное оборудование.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Способы снижения негативного воздействия на окружающую среду от производства алюминия .....	6
1.1 Отходы производства .....	6
1.2 Выбросы электролизного производства .....	10
1.3 Выбросы от производства электродов .....	19
1.4 Выбросы парниковых газов .....	33
2 Выбор пути снижения негативного воздействия от производства алюминия.....	37
3 Анализ текущей ситуации на предприятии .....	43
3.1 Обследование действующих ГОУ .....	43
3.2 Анализ используемого сырья .....	48
3.3 Анализ процесса производства анодов .....	49
4 Разработка мероприятий, позволяющих снизить выброс бен(а)пирена ...	54
5 Расчет экономической эффективности .....	60
Заключение .....	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	65

## ВВЕДЕНИЕ

Основным и единственным видом получения первичного алюминия в промышленных масштабах является технология Эра-Холла. Современные предприятия используют технологию с использованием обожжённых анодов. В России заводы по получению первичного алюминия преимущественно состоят из трех крупных подразделений, среди которых: электролизное производство, литейное производство и производство электродов. Также в состав предприятия входят вспомогательные цеха и производства.

Ответственное использование природных ресурсов, охрана окружающей среды, обеспечение экологической безопасности производственной деятельности в соответствии с международными и российскими законодательными требованиями являются неотъемлемыми частью деятельности любого предприятия.

Актуальность вопросов повышения экологической безопасности обостряется с наращиванием антропогенного воздействия на окружающую среду.

Негативное воздействие на окружающую среду можно классифицировать по воздействию на составляющие биосферы: атмосферу, гидросферу и геосферу. Производство первичного алюминия не исключение. Негативное воздействие на биосферу алюминиевые заводы оказывают за счет выбросов в атмосферу, сбросов в гидросферу и образование и размещение отходов на поверхности геосферы.

К значимым воздействиям предприятий можно отнести: 1.

Специфические компоненты химического загрязнения окружающей среды:

- а) бенз(а)пирен;
- б) фтористые соединения (фтороводород и плохо растворимые неорганические фториды);
- в) оксид алюминия;
- г) диоксид азота;
- д) диоксид серы;

ж) оксид углерода.

2. Специфические технологические отходы:

а) отработанная угольная футеровка электролизеров;

б) отработанная кирпичная футеровка электролизеров;

в) огарки обожженных анодов алюминиевого производства;

3. Потребление водных ресурсов.

4. Выделение специфических парниковых газов  $C_2F_6$  (перфторэтан) и  $CF_4$  (перфторметан).

Целью диссертации является поиск путей снижения негативного воздействия на окружающую среду от предприятий по производству первичного алюминия.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить задачи:

- изучение литературы в области выбранной проблематики;
- выбор пути снижения негативного воздействия от производства алюминия;
- изучение выбранного способа снижения негативного воздействия;
- анализ текущей ситуации на выбранном предприятии;
- разработка мероприятий, позволяющих снизить негативное воздействие от производства алюминия.

Ожидаемый эффект от выполнения поставленных задач:

- снижения экологической нагрузки на окружающую среду;
- снижения платежей за негативное воздействие на окружающую среду;
- повышение лояльности сотрудников предприятия и местного населения.

# **1 Способы снижения негативного воздействия на окружающую среду от производства алюминия**

## **1.1 Отходы производства**

Проблема перерабатывающих предприятий заключается в образовании и накоплении значительных объемов отходов в процессе деятельности. В последние годы экологическое законодательство ужесточается, как следствие, растут платежи, штрафы, вводятся запреты на захоронение и обязательства по переработки. Проблема с отходами, образующимися в ходе деятельности предприятия и по своим свойствам схожими с бытовыми отходами, в последние годы практически разрешена через реализацию или безвозмездную передачу таких отходов переработчикам. Острой проблемой остаётся образование значительных объемов промышленных специфических отходов, которые не соответствуют требованиям переработчиков. Отходы от газоочистного оборудования, мелкая фракция угольной и кирпичной футеровок электролизёров, углесодержащие отходы производства электродов подлежат захоронению на полигонах.

Современное законодательство и переход Российской Федерации на наилучшие доступные технологии вынуждает предприятия переходить к переработке собственных отходов и дает возможности получить экономический эффект от неё.

В 2012 году была опубликована статья «Направления переработки мелкодисперсных углеродных отходов, образующихся при производстве анодов». В статье были предложены варианты переработки основных отходов от производства анодов [1,2].

В цехе производства электродов (ЦПЭ) ОАО «РУСАЛ-Саяногорск» образуются следующие виды мелкодисперсных углеродных отходов, требующих переработки (рис. 1):

- Пыль с технологических кранов;
- Пыль со станции очистки анодов и ниппельных гнезд;

- Аспирационная пыль участка сушки и отсева кокса;
- Аспирационная пыль дробильно-размольного отделения;
- Фракция –0,5 мм после отсева дробленых огарков;
- Аспирационная пыль при дробеструйной очистке огарков;
- Крупка, не уловленная при дробеструйной очистке огарков;
- Аспирационная пыль участка дробления огарков.



Рисунок 1 – Виды мелкодисперсных углеродных отходов

Из всего объема образующихся мелкодисперсных углеродных материалов в производстве электродов только часть реализуется стороннему потребителю. Фракция – 0,5 мм с дробления огарков возвращается в процесс производства электродов, а весь остальной объем размещается на полигонах. При этом из-за высокого загрязнения примесями электролита (натрий и фтор) и железа (чугунная заливка) актуальным является вопрос вывода фракции – 0,5 мм из процесса производства анодов. Вывод фракции –0,5 мм позволит улучшить качество обожженных анодов, снизить их расход на 4 кг/т Al и улучшить состояние огнеупоров печей обжига за счет снижения содержания натрия и фтора в «зеленых» анодах. Вовлечение аспирационной пыли

отделения обжига в процесс производства анодов невозможно по причине чрезмерного загрязнения огнеупорами и компонентами электролита (натрий и фтор). Аспирационная пыль и крупка дробеструйной машины АМО содержат также чрезмерное количество железа (изношенная дробь), остатков электролита и углерода огарков [1].

Компонентный состав представлен в большей части углеродом (более 90%). Такое содержание углерода в отходах предопределяет направление использования углеродных отходов в качестве шихты при производстве топлива. Авторами предложен вариант использования мелкодисперсных углеродных материалов в качестве наполнителя в топливных брикетах с теплотой сгорания не менее 25000 кДж/кг. Второй вариант – использовать отходы от производства электродов в качестве минерального порошка в асфальтобетонных смесях [1].

За счет низкого содержания летучих соединений в углеродсодержащих отходах процесс горения начинается при температуре свыше 500 °С. Высокая температура воспламенения осложняет применение отходов для производства топлива без смешения с более высокореакционным топливом, например, углем. В сочетании с высокореакционными углями или полукоксом они могут быть успешно применены в брикетированном виде для отопления различных технологических агрегатов и в качестве восстановителя при производстве кремния.

Для достижения технического результата в части повышения теплоты сгорания и обеспечения экономической эффективности при сжигании топливных брикетов на основе углеродных отходов их теплотворная способность должна быть не ниже 20 000 кДж/кг. Для гарантированного выполнения этого условия содержание углеродсодержащих отходов в топливных брикетах должно быть не менее 25%. Температура воспламенения мелкодисперсных углеродных отходов значительно выше температуры воспламенения бурого угля при термоокислительном нагреве. Анализ процесса горения угольных отходов показывает, что для воспламенения



брикета за счет угля, максимальное содержание углеродсодержащих отходов не должно превышать 85%. Изучение выделения летучих соединений при горении аспирационной пыли и бурого угля позволяет сделать вывод, что при горении топливных брикетов дополнительные загрязняющие вещества не выделяются.

За счет использования углеродных отходов, образующихся на предприятиях по производству алюминия, увеличивается количество выделяющийся теплоты при сгорании топливных брикетов, уменьшается зольность при полно сгорании и снижается экологическая нагрузка на окружающую среду за счет снижения захоронения части промышленных отходов.

Проведенные предварительные лабораторные исследования показали возможность использования аспирационной пыли для получения дорожного асфальтобетона. Для окончательного заключения необходимо провести более широкие исследования с изготовлением асфальтобетонных образцов на основе мелкодисперсных углеродных отходов, а для внедрения в производство составить технические условия на порошок. По причине значительного содержания железа (дробь), остатков электролита и углерода огарков в аспирационной пыли и крупке, образующейся при работе дробеструйной машины, целесообразна их переработка в электролизерах «АВ», планируемых к отключению. В рамках реализации данных направлений возможна переработка всего объема образующихся в ЦПЭ отходов [1].

## 1.2 Выбросы электролизного производства

При анализе литературы в области снижения выбросов прослеживается тенденция работы мирового сообщества в нескольких основных направлениях: снижения выбросов при выполнении регламентных операций; снижение выбросов за счет увеличения герметизации или увеличения газоотсоса; снижения образования выбросов за счет изменения технологических параметров газоочистного оборудования; увеличения эффективности работы газоочистного оборудования.

В 2012 году в компании Rio Tinto Alcan разработали и применили новые шторные укрытия электролизеров, конструкция которых позволяет существенно снизить количество неплотностей по сравнению с используемой конструкцией. Количество неплотностей сокращается на более чем 50%. За счет значительного снижения неплотностей снизилось и количество выбросов на 50% в межоперационный период.

Для снижения выбросов в период регламентных работ на электролизёрах применяется система увеличения объема извлекаемых газов, за счет индикаторного увеличения разрежения под шторными укрытиями электролизёра за счет инжектора, установленного в газоотводящем патрубке, соединяющем пространство под укрытием электролизера и сборным коллектором. Во время разгерметизации объем газоотсоса увеличивается с 2,5 м<sup>3</sup>/с до 4,5 м<sup>3</sup>/с. Увеличения газоотсоса обеспечивается дополнительными вентиляторами [3,4].

В последнее время наблюдается тенденция разработки и внедрения высокоамперных электролизеров силой тока 300 кА и выше. Однако, высокая мощность электролизера и жаркий климат создали ряд проблем в эксплуатации газоочистного оборудования. В этих условиях в летнее время года температура газов на входе в газоочистные установки может достигать 190 °С и более, что существенно выше допустимых температур 140–145 °С для полиэстера, материала рукавных фильтров. Замена полиэстера на более

термостойкие ткани, работающие при 200 °С и выше, приведет к значительному, 3–4-кратному удорожанию рукавных фильтров. Кроме этого, с увеличением температуры очищаемых газов снижается эффективность работы газоочистных установок вследствие интенсивной десорбции уловленного фтористого водорода с глинозема. В процессе электролиза в целом около 50% энергии, примерно 7 кВт ч/кгAl, теряется в виде тепла, из них порядка 35 % (2,45 кВт ч/кгAl) – с отходящими от электролизеров газами. Отсюда особую актуальность приобретает необходимость охлаждения газов перед их очисткой в ГОУ [5].

Простейший способ охлаждения отходящих газов – разбавление газов воздухом, забираемым из окружающей среды. Данный способ применяется уже более 30 лет и подтвердил свою эффективность. Необходимый объем воздуха подается через заслонки и обеспечивает необходимое охлаждение отходящих газов. Эта система эффективна в том случае, когда охлаждение газов требуется в течении нескольких дней в году, ввиду его дороговизны за счет увеличения энергопотребления. Охлаждение газов на 10 °С эквивалентно увеличению объема газоотсоса на 10%. При больших объемах газоотсоса для поддержания постоянной скорости фильтрации и исключения проскока пыли через фильтровальную ткань возникает потребность в дополнительных площадях фильтров, возрастает расход сжатого воздуха на регенерацию рукавов и затраты на техническое обслуживание ГОУ [5].

Альтернативным способом охлаждения можно считать впрыск воды позволяющих охлаждать отходящие газы на 10– 30 °С.

Однако этот способ требует непрерывный мониторинг работы системы распыливания воды и постоянное её обслуживание.

Еще один способ охлаждения осуществляется за счет охлаждения газов по мере их движения за счет стержневого охладителя. Система охлаждения газов за счет стержневого охладителя разработана и запатентована фирмой Solios [6]. Охладительное устройство представляет собой вертикально расположенные стержни, выполненные из металла, установленные в газоходе

внутри U-образного участка, соединяющего электролизеры с общим газоходом. Потери давления за счет дополнительного сопротивления в таком охладителе компенсируются за счет сокращения физического объема эвакуируемого газа. Газ охлаждается в среднем на 10 °С. Систему отличает простота конструкции [7].

Также для охлаждения газов применяется кожухотрубный теплообменник, встроенный в нижнюю часть газоочистного реактора. При этом теплообменник играет дополнительную роль газораспределительной решетки, обеспечивающей равномерное распределение газового потока по поперечному сечению реактора. Охлаждающая вода подается в межтрубное пространство, газ – в трубное, охлаждаясь на 50–60 °С. Система охлаждения позволяет нагреть воду в теплообменнике до 80–110 °С и в дальнейшем использовать это тепло для отопления зданий в районах с умеренным климатом [5].

Фирмой Alstom разработан горизонтальный теплообменник охлаждения газов, внедрение которого позволяет повышать силу тока при сохранении низких уровней выбросов HF, а также собирать до 25 мВ тепла анодных газов от каждого электролизера, с его последующим применением на производство тепловой или электрической энергии, подогрев (сушку) сырья (свежих анодов, глинозема, кокса), отопление, охлаждение или опреснение воды [8].

Горячая вода на выходе из теплообменника обычно имеет температуру 60-90 °С, что делает ее непригодной для выработки электроэнергии традиционными генераторами. В данном случае производство электроэнергии возможно в машинах Ранкина (ORC), использующих вместо пара органическую жидкость (хладоагент) с низкой температурой кипения. В этом случае горячая вода служит источником нагрева органической жидкости. Эффективность машины ORC может быть рассчитана как отношение мощности к количеству подводимого тепла [9,10].

В ходе промышленных испытаний было установлено что машина ORC, способна производить до 50 кВт·ч электроэнергии. Усреднённая выработка

электрической энергии составила 44 кВт·ч при тепловой мощности теплообменника от 6 до 800 кВт.

Невзирая на достаточно невысокую достигнутую эффективность, порядка 6-7 %, и значительный объем инвестиций в проект, работы в данном направлении, по мнению разработчиков системы, являются перспективными [5].

Во всем мире большинство алюминиевых заводов не имеют систем очистки электролизных газов от  $\text{SO}_2$ . Однако ужесточение экологических требований и рост содержания серы в нефтяных коксах заставляет внедрять такие системы. Компания Alcoa представила встраиваемый в газопровод горизонтальный скруббер-очиститель газов печей прокаливания кокса от диоксида серы и пыли [11]. Производительность аппарата от 3200 до 4049  $\text{м}^3/\text{мин}$ , расход орошающей жидкости – раствора  $\text{NaOH}$ , около 40 литров на 100  $\text{м}^3$  очищаемых газов, общее сопротивление аппарата около 0,05 м вод. ст., эффективность улавливания  $\text{SO}_2 > 90 \%$ ,  $\text{HF} > 80 \%$ , энергозатраты на очистку газов на 30-40 % ниже, чем в традиционных «мокрых» технологиях [12].

Также специалистами компании Alcoa предложено с помощью мокрых скрубберов, установленных под крышей корпусов старых алюминиевых заводов очищать фонарные выбросы от электролизеров. При работе герметичного электролизера, эффективность улавливания  $\text{HF}$  может достигать 99,5 %, что обеспечивает удовлетворительные экологические показатели. Однако при выполнении технологических операций, связанных с разгерметизацией укрытия (замена анода, снятие пены, подтягивание осадка, выливка металла и пр.) уровень фонарных выбросов существенно возрастает.

Для снижения этих выбросов на новых заводах внедряются двухконтурные системы, увеличивающие объем газоотсоса от разгерметизированного электролизера (одна из таких систем представлена ниже). На старых заводах такие системы отсутствуют, поэтому на них в качестве контрмер могут быть применены вышеупомянутые мокрые скрубберы. Испытания такой системы проведены на заводе, пущенном в

эксплуатацию в 1970 г., состоящем из двух электролизных серий, оснащенных 240 электролизерами силой тока 150 кА [12].

Система очистки фонарных выбросов включает 112 скрубберов, орошаемых раствором каустической соды с  $\text{pH} = 10$ . Улавливание и транспортирование загрязненных газов осуществляется вентиляторами, размещенными над скрубберами. В период испытаний оценка эффективности очистки газов и уровня выбросов проводилась с помощью волоконнооптической системы. Степень очистки фонарных выбросов от HF превысила 90 %. Также были определены способы сокращения количества эксплуатируемых скрубберов за счет более рационального распределения потоков от крышных вентиляторов [13,14].

Существуют решения по улавливанию выбросов от охлаждаемых анодных огарков и транспортировке последних. Охлаждать огарки предложено в контейнерах с глиноземом, находящимся в псевдооживленном состоянии. Установка огарка в контейнер занимает несколько секунд. При этом не требуются дополнительные укрытия, т.к. выбросы HF прекращаются мгновенно, по мере погружения огарка в глинозем. Для оценки уровня выбросов контейнер ограждался щитами от воздействия общих потоков воздуха в корпусе. Общий вклад огарка в фонарные выбросы составил 0,24 кгHF/тAl. Оснащение корпуса достаточным количеством контейнеров способно снизить фонарные выбросы на 50 %. Транспортировать аноды и их огарки предлагается на трейлерах в контейнерах. Глинозем в контейнерах может использоваться повторно, его частичная дозаправка осуществляется периодически. Выгрузка фторированного глинозема – через низ контейнера, удалением подвижной сетки. Для завода, оснащенного 200 электролизерами, потребуется 12 трейлеров, каждый из которых перевозит 6 огарков. Сжатый воздух для псевдооживления глинозема может быть взят из общекорпусной системы. Ориентировочная стоимость решения 2 млн \$, которые окупаются за счет снижения выбросов и потерь фторидов [12,15,16].

Еще одно вариант снижения фоновых выбросов предложен компанией Rio Tinto Alcan. Предложение заключается в охлаждении анодных огарков в герметичных контейнерах со 100 % герметизацией (Рис. 2) [17].



Рисунок 2 – Прототип герметичного укрытия

Экспериментальная установка испытывалась в течение 24 часов. Время удаления огарка из электролизера, установка на него герметичного укрытия и установка короба под вытяжной зонт составило 10 минут. Уровень выбросов оценивался в непрерывном автоматическом режиме. Установлена зависимость интенсивности выбросов HF (мг/с) от степени укрытия, которая подтверждает преимущество полной герметизации огарка. В этом случае выбросы HF сокращаются на 88 %, в сравнении с выбросами от открытого огарка. Также в период испытаний оценивалась концентрация CO под укрытием, с целью предотвращения скопления ее взрывоопасной концентрации в замкнутом пространстве. Однако, этот уровень не превышал 20 % нижнего концентрационного предела взрываемости оксида углерода. Параллельно с проектированием и тестированием герметичных контейнеров велись исследования в части реализации данной технологии на алюминиевых заводах, с разработкой схем логистики. Охлаждение огарка в герметичных

контейнерах включает в себя следующие шаги: – транспортирование укрытия к электролизеру; – извлечение из электролизера огарка, установка нового анода и герметизация огарка; – удаление укрытия с хранящегося на поддоне анода; – хранение [18,19].

Современное газоочистное оборудование представляет собой систему, состоящую из нескольких ступеней очистки, в зависимости от назначения, например, электрофилтра и ступени мокрого пылеулавливания. На сегодняшний день наибольшую популярность в мире приобрели газоочистные установки, оснащённые блоками рукавных фильтров различных видов и конструкций. В отношении алюминиевой промышленности важно указать, что «сухие» газоочистные установки (далее – СГОУ) обладают эффективностью очистки, достигающей 99%, от большинства маркерных загрязняющих веществ [20].

В данной области стремление к совершенствованию требует постоянного компромисса производительности, качества очистки и затрат на данное улучшение. Эта взаимосвязь является основной проблемой для любого производства, что вызывает потребность в постоянной модернизации газоочистного оборудования.

При простоте общей конструкции система «сухой» газоочистки представляет собой достаточно тонкую систему, завязанную на балансе производительности по пропускной способности очищаемого газа и степенью очистки от загрязняющих веществ. Стоит отметить, что очистка электролизных газов производства алюминия отличается по технологии очистки, применяемых в других отраслях. Специфика заключается в необходимости поддержания слоя адсорбента (оксида алюминия) на поверхности фильтрующего элемента. Данная особенность связана с технологическим процессом улавливания газообразного фторида водорода, позволяющим достигнуть параметров очистки по данному загрязняющему веществу более 99 %. Эта же особенность является камнем преткновения для соблюдения баланса технологического процесса очистки. Распределяясь по



поверхности фильтровального рукава, слой глинозёма какое-то время присутствует на фильтровальном материале. Накапливаясь, он увеличивает аэродинамическое сопротивление рукавного фильтра, вызывая дополнительную нагрузку на дымососные машины СГОУ. Для снижения сопротивления внутри рукавного фильтра и обновления слоя фторированного глинозёма применяется система регенерации фильтровальных рукавов, выполненная по схеме импульсной продувки сжатым воздухом. Очищенный газ поступает в камеру чистого газа с последующей эвакуацией на ступень очистки №2 или на дымовую трубу с последующим выбросом в атмосферу.

На большинстве существующих СГОУ ОК РУСАЛ применяется классическая схема компоновки газоочистного оборудования с вертикальным расположением фильтровальных рукавов цилиндрической формы (Рис. 3). Стандартным фильтровальным материалом для производства фильтровальных рукавов, использующихся в алюминиевой промышленности, является нетканый полиэфир, обладающий хорошим сочетанием термостойкости и устойчивости к износу [12].



Рисунок 3 – Фильтровальный рукав цилиндрической формы

Для дальнейшего увеличения эффективности СГОУ необходимо увеличить площадь фильтрующей поверхности. Увеличение площади позволит повысить объём пропускаемого отходящего газа и уменьшить удельную нагрузку на фильтровальные рукава. В начале 2000-х гг. компания Albany вышла на рынок с новой конструкцией рукавных фильтров под маркой StarBag (Рис. 4). Представленные фильтры отличались увеличенной площадью фильтрующей поверхности в 2,2 раза по сравнению с используемыми на тот момент фильтровальными рукавами. Выполненные испытания на действующих газоочистных установках заводов по производству алюминия подтвердили эффективность разработанных рукавов новой конфигурации (гофрированных). Гофрированные рукава стали использоваться практически во всех странах мира, где находится алюминиевое производство.



Рисунок 4 – Конструкция фильтровальных рукавов с увеличенной площадью фильтрации

Опыт применения данного типа фильтровальных рукавов на одном из алюминиевых заводов продемонстрировал эффективность более дорогих гофрированных рукавов, снизив эксплуатационные показатели потребления

электроэнергии на 29%. Данный эффект экономии был достигнут за счёт улучшенных аэродинамических показателей новых фильтровальных (гофрированных) рукавов, позволивших снизить аэродинамическое сопротивление в рукавных фильтрах СГОУ [12].

При производстве алюминия более 95% образующихся загрязняющих веществ от процесса электролиза улавливается герметичной системой газоотсоса и направляется на очистку в ГОУ, и лишь менее 5% отходящих от электролизера газов направляются в окружающую среду через аэрационные фонари (неорганизованные выбросы). Тем не менее, неорганизованные выбросы являются значительной долей суммарных выбросов заводов, превышающих 50%.

На предприятиях компании Alcoa (США), внедрена система мониторинга, имеющая относительно не высокую стоимость, контролирующая величину выбросов HF, SO<sub>2</sub> и пыли в режиме реального времени. За счет простоты и компактности система позволяет реализовать контроль объема выбросов на отдельно взятом электролизере при выполнении на нем различных технологических операций, с записью на видеокамеру способа выполнения работ. Такой подход обеспечивает возможность анализа экологической эффективности методов обработки электролизера и их дальнейшего совершенствования [2].

### **1.3 Выбросы от производства электродов**

Важнейшая составляющая электрода в производстве алюминия – это пек. Постепенно каменноугольный пек переходит из группы дешевых и доступных материалов, в группу стратегических материалов. Уникальные свойства конструкционных углеграфитовых материалов на основе пека стимулируют его широкое применение. В то же время производство электродов из каменноугольных пеков и коксов ассоциируется с выбросами полициклических ароматических углеводородов, являющихся канцерогенами. Выбросы бенз(а)пирена и других ПАУ представляют серьезную

экологическую проблему и влекут экономическую нагрузку на предприятия. Для снижения негативного воздействия на окружающую среду за счет снижения выбросов ПАУ необходимо понимать от чего зависит объем образования канцерогенов при производстве электродов. Как показывают промышленные опыты выделение ПАУ тесно связано с процессами, протекающими при нагревании пека и кокса (Рис. 5) [21]. При производстве электродов пек нагревают в интервале от 300 °С до 1000 °С. В работе охвачен весь интервал и сделаны ключевые выводы [22,23,24].

При нагревании до температур 200–400 °С пек подвергается жидкофазным процессам полимеризации, где инициатором выступают стабильные радикальные центры, содержащиеся в пеке [25,26]. Развитие этих реакций приводит к постепенному накоплению и структурному упорядочению высокомолекулярных ароматических молекул с образованием зародышей анизотропной фазы – мезофазы [27,28]. Повышение температуры до 500 °С приводит к развитию радикальных процессов и фазовому переходу в системе. В области 500 °С – области образования полукокса, идет интенсивное образование газообразных (Рис. 6) [29] и конденсированных продуктов.

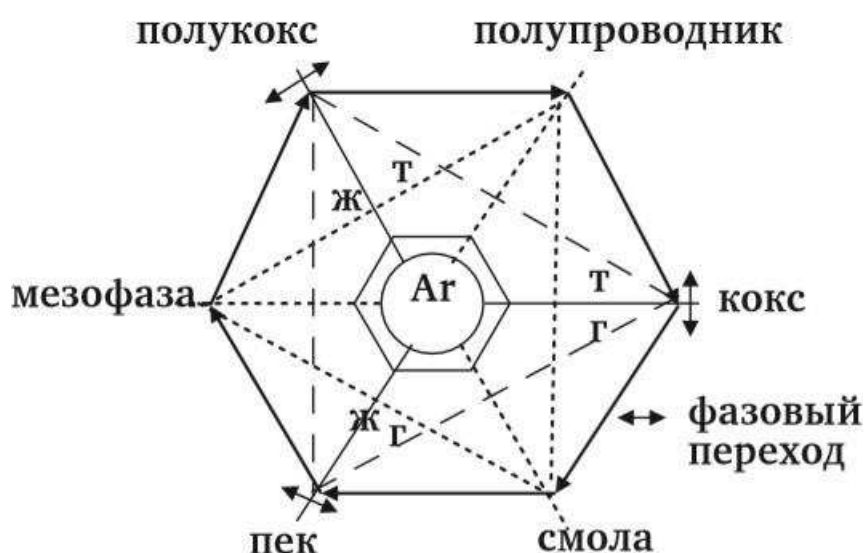


Рисунок 5 – Модель термохимического превращения пека (ж – жидкая, т – твердая, г – газообразная фазы)

Область 500 °С характеризуется сопряженным переходом протекания процессов из жидкофазной среды в твердофазную – крекинг-поликонденсация. При этом легче протекают процессы полимеризации и конденсации веществ, имеющих наиболее близкую к графиту структуру и труднее – веществ, заметно отличающихся от нее. По мере увеличения содержания конденсированных структур наиболее дефектные, несопрягающиеся с основной углеродной матрицей фрагменты аккумулируются в оставшейся «жидкой» части твердого остатка, которые постепенно удаляются в виде смолистых веществ, включая канцерогенноопасные ПАУ, т.е. помимо микроструктурных изменений начинают протекать макроструктурные трансформации [13].

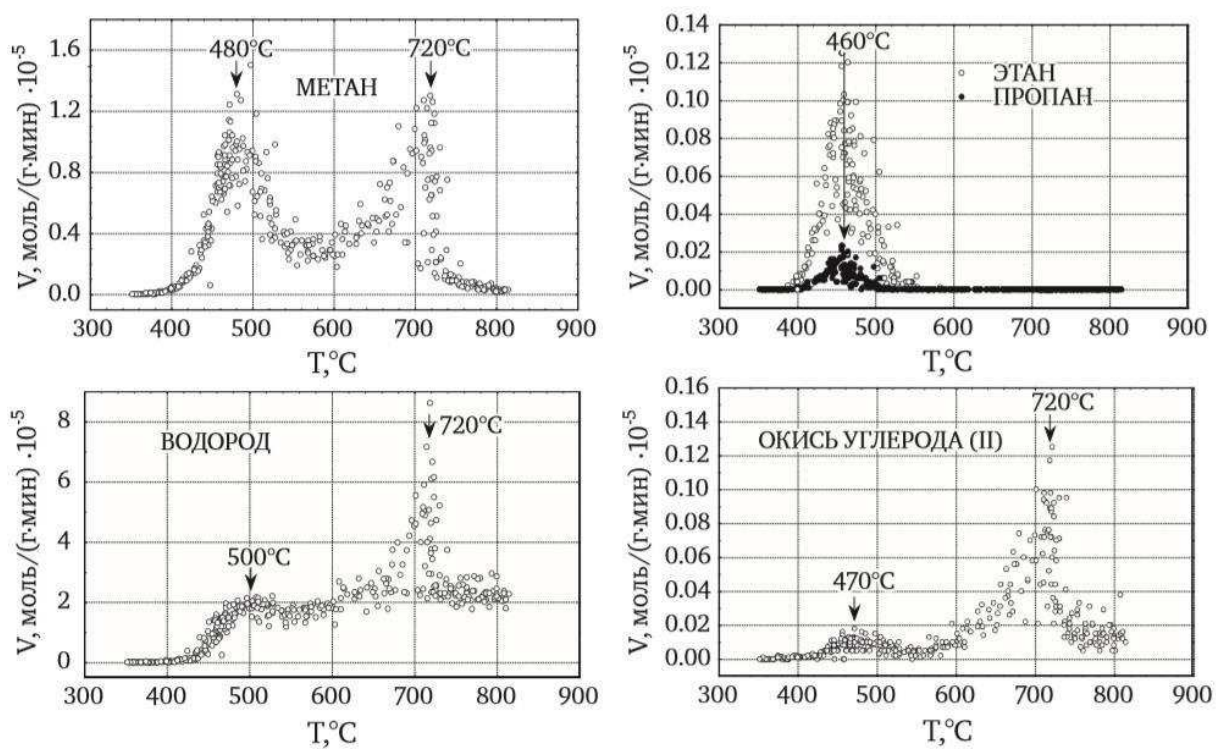


Рисунок 6 – Зависимость скорости образования газов от температуры в процессе замедленной карбонизации среднетемпературного пека

В области 600 °С начинают доминировать твердофазные процессы, и углеродистый продукт по свойствам приближается к полупроводникам. В

данной области происходит переход системы от микродоменной структуры, в которой отдельные домены структурно разобщены, к монолитной структуре кокса, где концентрация парамагнитных центров достигает максимальной величины [30]. В области 700 °С, как и при 500 °С, наблюдается второй фазовый переход в системе, сопровождаемый заметными физико-химическими изменениями: образованием кокса и смолистых веществ, суммарным тепловым экзоэффектом. На рисунке 7 показаны выходы смолы и ПАУ при замедленной карбонизации среднетемпературного и высокотемпературного пеков. Первичная смола выделяется в области 500 °С, и содержит, в основном, низкомолекулярные ПАУ – антрацен и фенантрен; интенсивное выделение смолы и ПАУ наблюдается в интервале 600–750 °С [13].

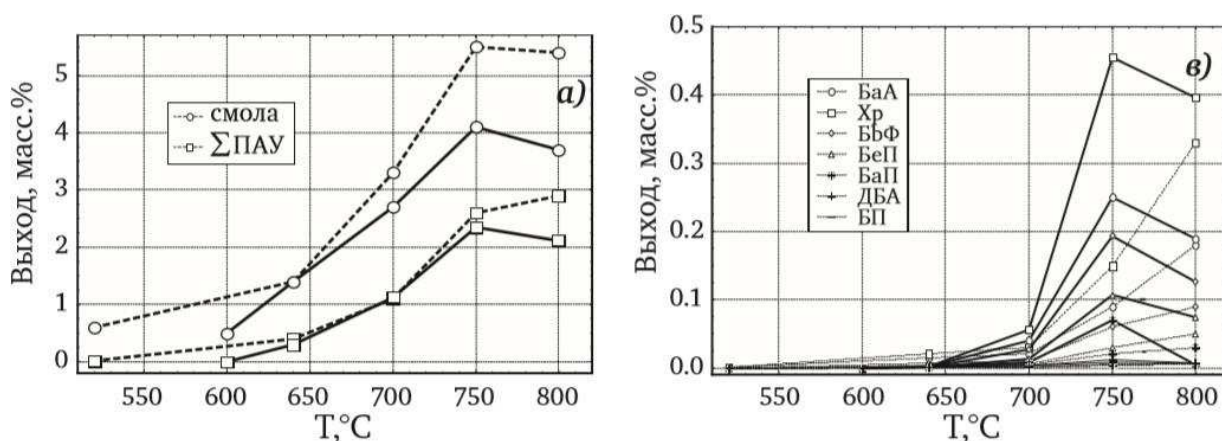


Рисунок 7 – Выходы смолистых веществ и ПАУ при разных температурах карбонизации

Сравнение выходов смолы, бензольного экстракта твердого остатка и содержащихся в них ПАУ, полученных в интервалах 520–640, 640–700 и 700–750 °С указывает на разные маршруты их образования в этих интервалах температур. В области 520–640 °С основная масса веществ, способных экстрагироваться, участвует в процессах поликонденсации с образованием конденсированных структур. В диапазоне 640–700 °С содержание ПАУ в

смоле в два раз меньше, чем в экстракте и характеризует доминирование процессов поликонденсации, хотя вклад процессов дистилляции повышается. В области 700–750 °С выходы смолы и экстракта близки, а содержание в них ПАУ имеют одинаковые значения, что указывает на дистилляцию их из углеродного остатка. Таким образом, узкий диапазон температур 700–750 °С характеризуется значительной структурной перестройкой углеродного остатка и «выбросом» дефектных, напряженных участков при формировании упорядоченной, графитоподобной структуры.

Дальнейший рост температуры существенно не влияет на эмиссию летучих веществ; упорядочение структуры углеродного продукта происходит в основном за счет дегидрирования конденсированных структур. По данным [10], при температурах 700–1000 °С протекает парофазный пиролиз бензола и более высокомолекулярных ароматических углеводородов с образованием фенил(арил)радикалов с последующей прямой ядерной конденсацией, в результате чего образуются более высокомолекулярные ПАУ, включая канцерогенноопасные.

Интенсивное выделение летучих продуктов соответствует фазовым переходам и значительным структурным изменениям в системе. Эмиссия высокомолекулярных ПАУ в большей степени обусловлена дистилляцией и высокотемпературным пиролизом в газовой фазе.

Ужесточение требований по защите окружающей среды, в частности касательно выбросов канцерогенных ПАУ (полициклических ароматических углеводородов) и в основном, бензопирена. Для данного вещества, в связи с его вредностью для здоровья человека, в Российской Федерации установлена предельно допустимая концентрация (ПДК), а ставка платы за него в 2019 5 472 968,7 рублей за тонну.

Технологии, применяемые на данный момент на алюминиевых заводах, не удовлетворяют современным требованиям. Из-за неоднородного состава отходящих газов традиционно применяемые циклопы, мокрые скрубберы и даже тканевые фильтры не обеспечивают требуемый законодательством

уровень очистки отходящих газов. Соответственно, необходимо искать новые подходы в решении проблемы путем применения современных технологий или комбинирования уже имеющихся способов очистки.

Основным источником канцерогенных выбросов в анодном производстве являются печи обжига анодов. Печи обжига, как правило, выбрасывают в 5–10 раз больше газов, чем заводы по производству углеродной массы. Состав выбросов также отличается в связи с различием температур при производстве. В печи обжига температуры до 1000 °С приводят к расщеплению и изменению состава ПАУ. В зависимости от качества сырья может возрастать содержание прочих загрязнителей. Использованные анодные огарки содержат значительное количество фтора. При вторичной переработке огарки смешиваются с коксом и пеком в цехе производства анодной массы, а при обжиге из них выделяется HF. Из набивочного материала выделяется диоксид серы. Кокс содержит до 2% серы по весу, часть из которой выделяется в процессе обжига. Выбросы серы могут быть даже выше в случае использования в качестве топлива мазута, который содержит до 5 % серы [31].

Традиционные методы, такие как электростатические фильтры или системы газоочистки с глиноземом для адсорбции HF, направлены на маркерные вещества и не способны улавливать летучие углеводороды и диоксид серы, а мокрые скрубберы эффективно улавливают диоксид серы, но также не способны улавливать ПАУ. В случае, если требуется удаление летучих и неожиданных углеводородов, представляется уместным применение термической системы. В большинстве случаев регенеративный термический окислитель является экономически оправданным решением. Основной технологией удаления газообразных углеводородов является термическое окисление, производимое при температуре 800–1000 °С. При таких температурах летучие углеводороды вступают в реакцию с кислородом с образованием диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и паров воды (H<sub>2</sub>O), которые



безвредны и не имеют запаха. Следовательно, дальнейшие проблемы с утилизацией продуктов реакции отсутствуют.

Газы проходят через нагреваемый теплообменник, заполненный керамическими трубчатыми блоками. Затем нагретые газы поступают в камеру сгорания (Рис. 8), где происходит полное окисление летучих углеводородов. Экзотермическая реакция от окисления летучих углеводородов сокращает количество теплоты, которое требуется от топливной горелки.

Очищенный горячий газ (Рис. 8) проходит через второй теплообменник, отдавая тепло керамическому наполнителю, и отводится в дымоход или непосредственно в атмосферу.

Смена цикла, осуществляемая посредством пневматических клапанов, приводит к попеременному прохождению входящих и отходящих газов через теплообменные камеры. Во избежание выбросов при смене цикла добавлена третья теплообменная камера, продуваемая чистым газом камеру, использовавшуюся последней (квадратная деталь на рис. 8). Каждая камера продувается по очереди и переходит с грязного газа на чистый и обратно.

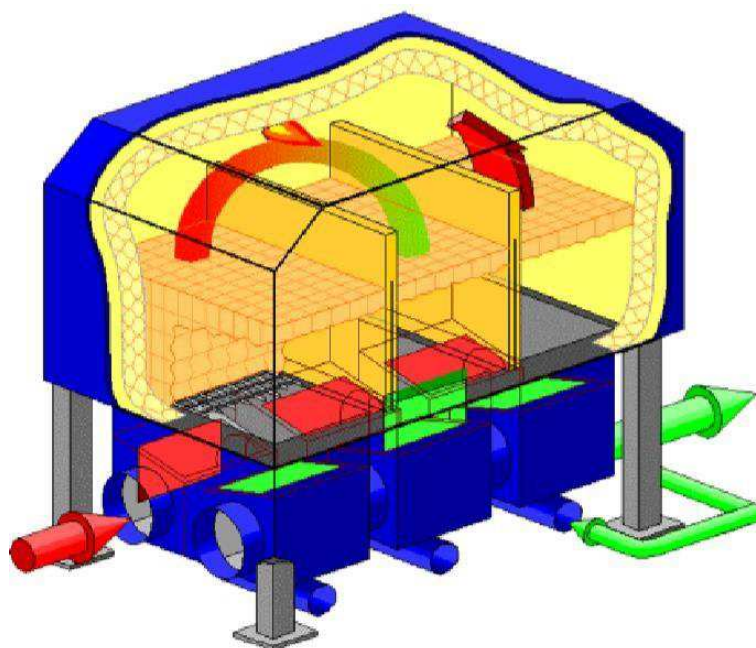


Рисунок 8 – 3-камерный регенеративный термический окислитель

В настоящее время системы РТО были поставлены на несколько печей обжига. Основной фокус во всех случаях был на ПАУ. Достигнутая эффективность разложения ПАУ, в том числе средний показатель (красная линия), показана на рисунке 9.

Также необходимо учесть и загрязнители в виде диоксида серы и водорастворимого фтора характерные для производства электродов в алюминиевой промышленности.

Существует несколько технологий для улавливания выбросов диоксида серы и водорастворимого фтора. В целом технологии сероочистки представлены сухими и мокрыми скрубберами (Рис. 10).

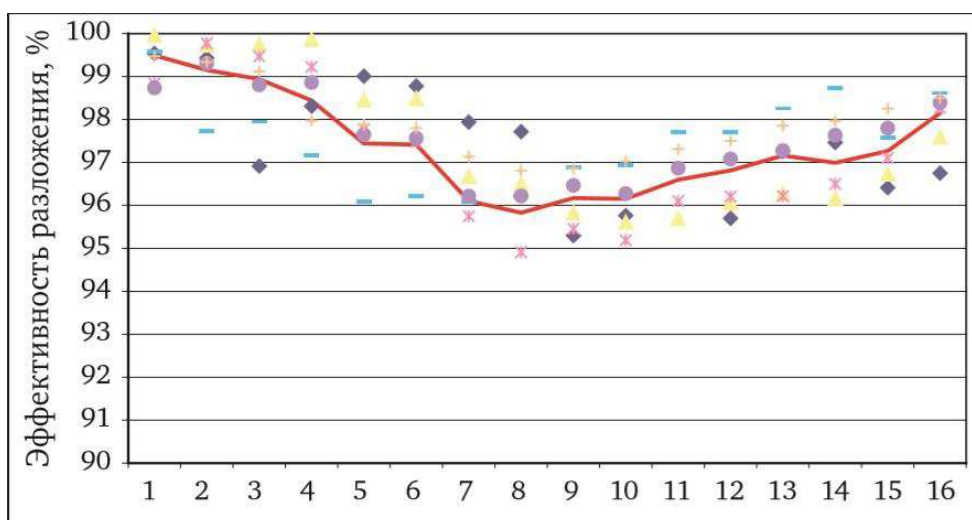


Рисунок 9 – Эффективность разложения (1 – нафталин, 2 – аценафтилен, 3 – аценафтен, 4 – флуорен, 5 – фенантрен, 6 – антрацен, 7 – флуорантен, 8 – пирен, 9 – бенз(а)нтрацен, 10 – хризен, 11 – бензо(б)флуорантен, 12 – бензо(к)флуорантен, 13 – Бензпирен, 14 – Индено-(1,2,3cd)-пирен, 15 - Дибенз(ah)антрацен, 16. Бензо (g, h, i) пириле

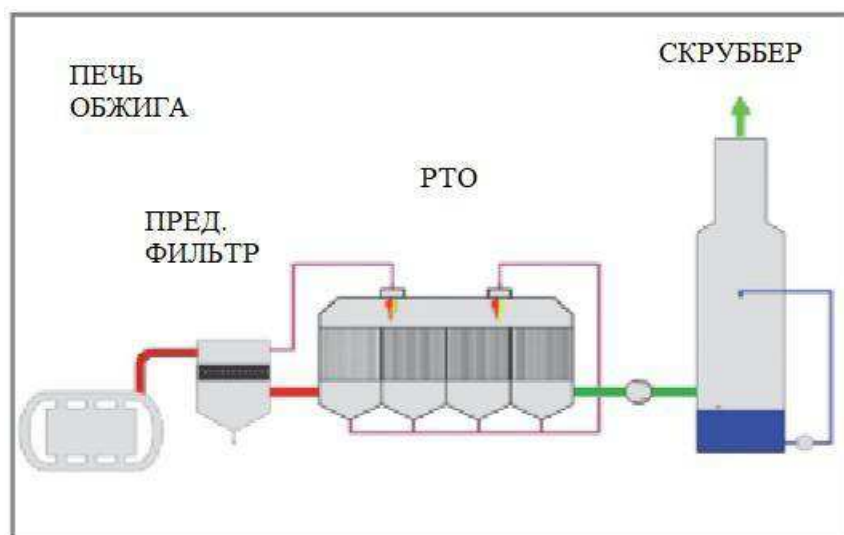


Рисунок 10 – Система удаления загрязнителей

В сухих скрубберах применяются высокопористые адсорбенты с большой удельной поверхностью, которые улавливают диоксид серы и превращают его в серные соли. Затем соли отделяются при помощи мешочных фильтров и требуют утилизации. Данная установка состоит из системы подачи адсорбента в газовый поток, высокоэффективной зоны смешивания и зоны сепарации прореагировавших частиц из потока чистого газа. В качестве адсорбентов применяется гидроксид кальция или смесь известняковых пород с другими компонентами, такими как кокс.

Мокрый скруббер основан на химической реакции, в результате которой образуется нейтрализованный раствор. Данный скруббер представляет собой камеру, в которой распыляется жидкий абсорбент и нейтрализующее вещество. Поскольку удельная поверхность распыленных частиц очень высока, достигается эффективное удаление диоксида серы. В зависимости от типа и количества нейтрализующего вещества достигается эффективность реакции более 90 %. В качестве жидкого абсорбента, как правило, выступает вода, а нейтрализующим веществом может быть каустическая сода, известняк, гашеная известь, карбонат натрия. Существует особый вариант данного скруббера, работающий на морской воде. В этом случае в качестве нейтрализующего вещества выступает карбонат натрия, содержащийся в

морской воде. Как и в случае с электростанциями, где сероочистка отходящих газов является неотъемлемой частью технологического процесса, выбор типа системы обуславливается требуемой эффективностью очистки. При больших объемах обрабатываемых газов и необходимости обеспечения эффективности более 90 % (с учетом ужесточения нормативов в будущем) представляется возможным применение только мокрых скрубберов [16].

Поскольку оба типа установок также удаляют HF, использование анодных огарков в качестве сырья не влияет на выбор установки, хотя и увеличивает расход реагентов.

Комплексная система газоочистки позволяет снизить содержание различных загрязнителей в соответствии с жесткими требованиями будущего по ограничению выбросов летучих углеводородов, ПАУ, HF и SO<sub>2</sub>. Однако, вопрос ограничения выброса CO остается актуальным.

В течение пяти лет на ПАО «Укрграфит» проводился систематический научнотехнический мониторинг процесса обжига, сопровождающийся экспериментальными измерениями режимных параметров работы печи, компьютерным моделированием температурных полей, аэродинамики газовоздушного тракта и пр.

На ПАО «Укрграфит» обжиг электродных заготовок осуществляется в многокамерных кольцевых печах закрытого типа со съёмным сводом. На входе в каждую камеру кольцевой печи измерялся состав дымовых газов с помощью газоанализатора Testo-330. Пределы измерения прибора Testo-330 позволили проводить измерения реальных концентраций оксидов углерода (CO), диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), коэффициента избытка воздуха, кислорода (O<sub>2</sub>), а также оксидов азота.

С точки зрения экологических требований при анализе полученных данных наибольшее внимание было уделено содержанию оксида углерода (CO), который, как известно, представляет собой опасный для здоровья газ.

При экспериментальных измерениях установлено, что изменение концентрации оксида углерода для всех печей имеет одинаковый

качественный характер с участком достаточно резкого возрастания содержания СО. В ряде случаев максимальные концентрации СО превышали 2000 мг/м<sup>3</sup>.

Кроме экспериментальных данных по содержанию газов в продуктах сгорания были получены, данные по содержанию оксидов азота.

Систематизация экспериментальных данных позволила также сделать следующие выводы:

- содержание СО в камерах огневой и последующих с температурами выше 700 °С незначительно;

- возрастание концентрации СО происходит в направлении снижения рабочих температур соответствующих камер по ходу движения дымовых газов;

- интенсивное увеличение концентрации СО происходит при температурах 600...650 °С;

- в камерах с рабочими температурами ниже 500 °С концентрация СО сохраняет свое достаточно высокое значение, достигнутое в предыдущих камерах.

Теоретически источниками образования оксида углерода могут быть следующие процессы:

- а) дегазация пека;
- б) взаимодействие паров воды с метаном (конверсия);
- в) взаимодействие паров воды с углеродом;
- г) неполного окисления смолистых и летучих веществ;
- д) окисления кислородом воздуха углеродосодержащих веществ, находящихся в печи (шихты) [32,33].

Далее в статье приведен анализ образования СО за счет различных процессов и сделан ключевой вывод. Реальный уровень концентраций СО обеспечивается:

- за счет частичного окисления шихтовых материалов;
- за счет окисления летучих и смолистых, выходящих из заготовок.

На основании проведённого анализа авторами статьи предложено несколько направлений снижения выброса СО.

Дожигание СО за печью в специальных реакторах. Метод, который не требует дополнительных исследований и изучен.

Этот процесс описывается уравнением:



Проблемой, которая при этом требует технико-экономического обоснования, является расчет расхода природного газа (или другого энергоносителя), который необходимо затратить дополнительно для повышения температуры всего объема дымовых газов до температуры воспламенения СО, т. е. 630...700 °С. Учитывая незначительные концентрации СО в дымовых газах, выигрыш за счет теплоты реакции практически несущественен. Таким образом, дожигание СО за счет внешней теплоты является затратной технологией.

Некоторое сокращение затрат на подогрев дымовых газов может быть достигнуто при применении катализаторов, снижающих уровень температуры реакции окисления. Это разнообразные смеси оксидов металлов, нанесенные на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  или другой огнеупорный материал.

Второй вариант – окисления парами воды. Конверсия СО в диоксид углерода может быть выполнена за счет окисления парами воды по реакции:



Процесс проходит эффективно при температуре 230–260 °С при использовании цинк-хром-медного катализатора или при температуре 370–440 °С при использовании железохромового катализатора.

Таким образом, непосредственная утилизация СО методом дожигания может быть упрощена за счет катализаторов окисления, учитывая низкую концентрацию веществ, способных гореть.

Оценка теплоты горения водорода, метана и смолистых веществ, находящихся в продуктах сгорания, показывает, что их количество недостаточно для нагрева дымовых газов до температуры утилизации СО.

Последние исследования предлагают в качестве более дешевых и надежных катализаторов различные соединения железа, в том числе железный купорос, оксид железа, оксид меди и пр.

Применение паровой конверсии путем впрыска диспергированной воды может быть выполнено на последних по ходу движения дымовых газов камерах печи. При температурах 300...450 °С каталитическая паровая конверсия монооксида углерода может дать выход до 80% прореагировавшего СО.

Третий вариант заключается в подборе параметров печи. Принципиальный вид графика обжига заготовок показан на рис. 11. Важной особенностью графика является стартовый уровень температур под сводом (>450 °С) и достаточно интенсивный рост температур на начальном этапе до 650 °С, что обеспечивает сгорание СО на последней по порядку камере от огневой камеры.



Рисунок 11 – Температурный график обжига заготовок (1 – температура под сводом, 2 – температура заготовок)

Необходимо отметить, что реализация показанного на рис. 11 графика обжига возможна при определенных параметрах обжиговой печи и характеристиках загрузки. Указанные параметры должны обеспечивать

определенную тепловую инерцию, чтобы скорости нагрева не превысили на начальном этапе допустимых пределов. Подбор параметров производится при компьютерном моделировании процессов обжига.

Наряду с множеством работ по исследованию комбинирования продуктов нефтяного происхождения с традиционными каменноугольными пеками, приоритетным направлением исследований является прямое получение связующего пека экстракцией угля, обходя стадию его коксования.

Разрабатываемая технология получения экстрактивного пека путем термического растворения углей в органических растворителях имеет ряд преимуществ:

- содержание бенз(а)пирена в пеке снижается более чем в 3 раза в сравнении с каменноугольным пеком;
- выход пековых продуктов достигает 50-90 % в пересчете на органическую массу угля (для сравнения: выход каменноугольного пека из коксующегося угля 2 %);
- снижаются выбросы парниковых газов при производстве пека [34,35,36].

Сущность процесса получения экстрактивного пека заключается в деполимеризации, растворении и крекинге органической массы угля (ОМУ) под воздействием растворителя при температуре 350-420 °С и давлении 5-25 атм[37,38].

Для достижения качественных характеристик экстрактивного пека, близких к требуемым, но с низким содержанием бенз(а)пирена, потребовалось применить сложный состав растворителя. В результате был получен экстрактивный пек с пониженным в 3 раза содержанием бенз(а)пирена, при этом его качественные характеристики оставались удовлетворительными для производства анодной массы. Таким образом, инновационная технология производства связующего пека методом растворения углей, позволяет снизить выбросы бенз(а)пирена не менее чем в три раза [39,40].



## 1.4 Выбросы парниковых газов

Сейчас промышленное производство алюминия вносит более чем 1 % от мировых антропогенных выбросов парниковых газов. Существует два основных вида парниковых газов, выбрасываемых при производстве первичного алюминия: оксиды углерода и перфторуглероды. Перфторуглероды (ПФУ), которые составляют, главным образом, тетрафторид углерода или перфторэтан  $CF_4$  и, в меньшем количестве, перфторметан или гексафторэтан  $C_2F_6$ , формируются при работе алюминиевого электролизера.

Газообразные перфторуглероды, к сожалению, не адсорбируются поверхностью частиц глинозема, и поэтому они не могут быть собраны в имеющихся сухих скрубберах газоочистного оборудования. Таким образом, они уходят неадсорбированные через газоочистное оборудование и выбрасываются в атмосферу [41].

В среднем на тонну производимого первичного алюминия образуется 10 тонн  $CO_2$  (в настоящее время производится ежегодно более 60 миллионов тонн алюминия). Это соответствует в общей сложности приблизительно 600 миллионам тонн  $CO_2$  в год при производстве первичного алюминия. Обычно образуется около 1,0 кг ПФУ на тонну производимого алюминия. Это эквивалентно приблизительно 250 тоннам  $CO_2$ . Методами снижения выбросов парниковых газов в процессе электролиза алюминия являются:

- уменьшение нетто расхода анодов в электролизере;
- снижение частоты анодных эффектов (среднее количество на электролизере в сутки);
- снижение продолжительности анодных эффектов (среднее количество минут на электролизере в сутки).

Снижение расхода нетто анода в электролизере прямо пропорционально выбросам  $CO_2$  от электролизеров и вызван электрохимической реакцией, а также потерями вследствие воздействий воздуха и  $CO_2$ . Это параметр, на

который мы можем влиять в корпусах электролиза, и многие заводы в настоящее время включили этот параметр в список своих ключевых показателей эффективности (KPI) работы электролизеров.

Захват  $\text{CO}_2$  прямо на выходе из электролизеров технически возможный сценарий и может заключаться в сборе и очистке  $\text{CO}_2$  во время самого процесса электролиза. В настоящее время большое количество воздуха используются для обеспечения пониженного давления в анодном устройстве и во избежание попадания выбросов в корпус. Однако, концентрация для улавливания  $\text{CO}_2$  слишком низкая, и возникнет необходимость в концентрации отходящих газов.

Снижение частоты и продолжительности анодного эффекта позволит снизить интенсивность выбросов перфторуглеродов (ПФУ) и таким образом снизить выбросы  $\text{CO}_2$ . Наилучшая возможность существенного снижения выбросов парниковых газов от алюминиевых заводов заключается в регулировании анодного эффекта. Дальнейшие успехи за счет повышения эффективности процесса производства анодов или за счет повышения качества анодов, или контроля за электролизерами, обеспечивая снижение нетто потребление анодов, будут относительно невелики при сравнении. Для заводов, работающих на ископаемых источниках, снижение потребления электроэнергии, и в частности, потребления постоянного тока при электролизе, должно быть основной целью работы в рамках уменьшения экологических последствий [29].

В последние годы было несколько докладов показывающих, что при определенных обстоятельствах выбросы ПФУ также обнаруживаются во время нормальной работы электролизера [43,44,45]. Они были названы «выбросами ПФУ не во время анодного эффекта» или просто «выбросами ПФУ при низком напряжении»[46].

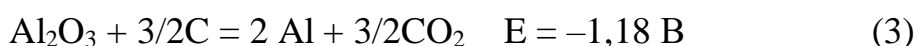
Нормальное напряжение на электролизере (3,7–4,5 В) является достаточно высоким для того, чтобы при определенных технологических условиях инициировать выбросы ПФУ. Выбросы ПФУ во время нормальной

работы являются проблемой, с которой сталкивается промышленность. Сообщается, что они, как правило, происходят во время замены анода и в конце периода недостаточного питания [47,48,49].

Согласно китайским данным, они могут составлять от 34 до 93 % от общего объема выбросов ПФУ, в среднем 70% [17].

Непрерывные записи выбросов ПФУ от серий электролизеров с предварительно обожженными анодами могут показать непрерывные низкие фоновые выбросы ПФУ. Как показано ниже, можно попытаться объяснить это явление на основе лабораторных исследований инициации анодного эффекта [18].

В реакции для нормально работающего электролизера анодным продуктом является  $\text{CO}_2$ :



При истощении электролита на основе криолита по глинозему может начаться разложение:



При увеличении установленного напряжения на графитовом аноде плотность тока возрастает до определенного пикового значения, названного «критической плотностью тока». После этого плотность тока падает обратно до очень низкого значения ( $\approx 0,04 \text{ А/см}^2$ ) при напряжении свыше около 3 В. Это напряжение является достаточно высоким для инициации образования ПФУ согласно реакциям (4) и (5). Именно так это и происходит [42].

Известно, что в области потенциалов 3–3,4 В анодный газ от криолитового расплава содержит 10–30 %  $\text{CF}_4$  [50]. Глиноземсодержащий расплав будет, вероятно, показывать более низкое содержание  $\text{CF}_4$ , но не равное нулю. Если теперь мы перейдем к промышленному электролизеру с множеством предварительно обожженных анодов, мы можем столкнуться со случаем, когда один или более анодов подвергаются истощению по глинозему. Тогда плотность тока у такого анода уменьшается из-за нехватки ионов

кислорода. Это означает, что падение омического напряжения через группу анодов и электролит уменьшается, и потенциал анода относительно алюминия соответственно повышается. Он может теперь проходить критическую плотность тока. Анод может находиться в этом режиме, пока не появится свежий растворенный глинозем [51].

Реальная ситуация может быть более сложнее, чем описано здесь, но эта трактовка дает, по крайней мере, правдоподобное объяснение того, что наблюдается. Если причиной проблемы является истощение по глинозему, то можно предложить пути ее исключения. Могут быть рассмотрены следующие мероприятия:

1. Улучшение распределения глинозема в электролизере;
2. Непрерывный мониторинг распределения тока по всем анодам с использованием доступных автоматических устройств;
3. Работа при более высокой средней концентрации глинозема.

Сегодня концентрация глинозема ограничивается, поскольку известно, что более высокий выход по току может быть достигнут работой на низких концентрациях глинозема. Однако можно пожертвовать выходом по току с целью снижения вредных выбросов ПФУ [42].


[Изъято 35 страниц]

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель магистерской  
программы д-р хим. наук,  
профессор

 Н.В. Белоусова


« 7 » 07 2020 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА**

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

«Поиск путей снижения негативного воздействия на окружающую среду от  
производства алюминия»

Руководитель

 7.07.20  
подпись, дата

канд. техн. наук, доцент  
А.С. Ясинский

Консультант по  
экономической части

 07.07.2020  
подпись, дата

канд. экон. наук, доцент  
Т.В. Твердохлебова

Выпускник

 10.06.20  
подпись, дата

В.П. Савченко

Рецензент

 10.06.20  
подпись, дата

Начальник отдела экологии  
АО «РУСАЛ Саяногорск»  
А.Р. Шоев

Красноярск 2020 год