

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Теплотехники и гидрогазодинамики

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В. А. Кулагин

подпись      инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код – наименование направления

Теплотехнический расчет системы газоудаления алюминиевого электролизера

тема

Научный Руководитель/

руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Профессор, д-р техн. наук

должность, ученая степень

А.П. Скуратов

инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.С. Климкин

инициалы, фамилия

Красноярск 2023

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа «Теплотехнический расчет системы газоудаления алюминиевого электролизера» содержит 65 страниц текстового документа, 10 использованных источников, 27 рисунков и 1 таблица.

ГСК, УХОДЯЩИЕ ГАЗЫ, ЭЛЕКТРОЛИЗЕР, ГАЗОХОДНАЯ СЕТЬ, ТЕПЛОТА НАГРЕВА, ЭЛЕКТРОЛИЗ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭКОЛОГИЧНОСТЬ, СИСТЕМА ГАЗОУДАЛЕНИЯ.

Объект исследования – система газоудаления электролизера, включающая в себя ГСК, горелочные устройства и газоходные тракты корпусов.

Цель работы – оптимизация и модификация конструкции системы газоудаления для повышения её эффективности и экологичности.

Рассмотрены проблемы отрасли производства алюминия и существующие технические решения, направленные на повышение экологичности и КПД системы.

Дана техническая информация по конструкциям электролизеров и системы газоудаления.

Проведен теплотехнический расчет элементов газоудаления, предложена рациональная конструкция ГСК и газоходной сети.

Предложено рациональное использование теплоты сгорания анодных газов в теплообменниках-бункерах и установках, выполняющих нагрев обожженного анода до ввода в электролизер.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Проблемы производства первичного алюминия .....	6
1.1 Проблемы отрасли производства алюминия .....	6
1.2 Краткая информация о производстве алюминия в России .....	8
1.3 Основные направления энергосбережения в электролизном производстве	9
1.4 Основные направления повышения экологической безопасности	
оборудования .....	14
1.5 Выводы по главе 1 и постановка задач работы .....	16
2 Оборудование и процессы производства алюминия .....	17
2.1 Общие сведения о конструкциях электролизеров различных типов .....	17
2.2 Современные проекты по модернизации заводов России .....	23
2.3 Конструкция системы газоудаления .....	25
2.3.1 Газосборный колокол электролизера с самообжигающимся анодом...	25
2.3.2. Горелочные устройства дожигания анодных газов .....	28
2.3.3 Газоходные тракты корпусов производства алюминия и способы их	
обслуживания .....	30
2.4 Вывод по главе 2 .....	37
3 Усовершенствование системы газоудаления электролизера .....	38
3.1 Расчетный анализ потерь теплоты поверхностями алюминиевого	
электролизера .....	38
3.2 Расчетный анализ энергетических затрат на эксплуатацию газоходной	
сети корпуса электролиза .....	44
3.3 Технические решения по утилизации теплоты процесса электролиза.....	47
3.4 Расчет газоходной сети корпуса электролитического производства	
алюминия .....	56
3.5 Выводы по главе 3 .....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	65
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	66

## ВВЕДЕНИЕ

Производство алюминия является одной из важнейших базовых отраслей промышленности, поскольку алюминий нужен практически во всех отраслях промышленности, а также данное производство является крупнейшим потребителем энергии и сырья, поскольку все процессы создания включают высокотемпературное оборудование. Алюминиевая промышленность всего мира получает больше 56 миллионов тонн в год, и на эти производственные мощности приходится около 8% мировой выработки электроэнергии. При анализе рынка делается вывод, что мировое потребление алюминия постепенно увеличивается с каждым годом, увеличиваясь примерно на 2200 килотонн в год на основе существующего производства.

В российской отрасли алюминиевой промышленности на производство тонны алюминия с использованием анодных электролизеров предварительного обжига и самообжигающихся уходит около 15,5 и 17 тысяч кВт·ч электроэнергии. Высокое энергопотребление алюминиевых электролизеров является результатом низкой энергоэффективности, в среднем не превышающей 40%, поскольку большая часть энергии, потребляемой электролизером, поступает в окружающую среду через его поверхность в виде тепла. В год тратится более 65 миллиардов кВт·ч на производство 3,7 миллиона тонн алюминия, что равно суммарной выработке трех гидроэлектростанций или тепловых электростанций, которые сжигают при этом около 25 миллионов тонн угля в год.

При изготовлении алюминия выделяется множество опасных газообразных и твердых веществ. Несмотря на то, что 85% этих веществ удаляются специальными системами, это недостаточно для соблюдения допустимых скоростей выбросов, предписанных законодательством РФ по защите окружающей среды. Низкая эффективность удаления газов привела к загрязнению воздуха во всем регионе, что вызывает опухолевые заболевания в

регионе, Красноярский алюминиевый завод является примером серьезного источника загрязнения.

Целью представленной бакалаврской работы – повышение эффективности, экономичности и экологичности производства алюминия, путем совершенствования системы газоудаления на Красноярском алюминиевом заводе.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Изучены виды конструкций электролизеров и системы газоудаления.
- Рассмотрены и сравнены конструкции секций ГСК с установленной изоляцией и без неё, в следствии чего уменьшены потери тепла в окружающую среду.
- Рассмотрены объемы теплоты на работу электролизера и технические решения использования теплоты сгорания анодных газов.
- Рассмотрены более рациональные решения конструкции газоходной сети.
- Проанализирована эффективность газоходной сети с применением предложенных решений.

# **1 Проблемы производства первичного алюминия**

## **1.1 Проблемы отрасли производства алюминия**

Растущие денежные затраты на электроэнергию, трудности с производством собственного сырья и усиление норм экологии начали приводить к тому, что алюминиевые заводы Западной Европы и Российской Федерации стали постепенно закрываться. Производство алюминия является одним из самых сильных источников загрязняющих веществ в атмосферу, поэтому вопросы обеспечения эко-безопасности производства алюминия должны решаться в первую очередь. По результату этого в алюминиевой промышленности проблема заключается не только в использовании наиболее экономичной и малозатратной технологии производства алюминия, но и в технологии, отвечающей требованиям современной охраны окружающей среды.

Газообразные продукты, такие как кислород и водород, образуются в процессе электролиза алюминиевых соединений. Важно эффективно удалить эти газы из электролита и собрать их для дальнейшей переработки, чтобы избежать негативных последствий.

Несмотря на то, что методы газоудаления различаются в зависимости от условий производства и используемого оборудования, существуют общие проблемы, связанные с этим процессом:

- недостаточная эффективность газоудаления, что может привести к высокой концентрации газов в электролите;
- образование пены в результате газового выделения, что может привести к неустойчивости электролита и остановке процесса производства;
- образование эмульсий в результате газообразных продуктов, что затрудняет их сбор и переработку.

Для решения этих проблем могут использоваться различные методы, такие как применение специализированного оборудования, подключение систем вентиляции и газоочистки или изменение режимов производства.

Основная причина возникновения проблем с газоудалением в элементах производства алюминия – это образование газов при электролизе. Газы образуются из-за реакции коксового дегтя с кислородом, который поступает с графитовой анодной поверхности. Образование газов приводит к образованию пенообразных образований на поверхности расплава и к разрушению электродов.

При производстве алюминия вырабатывается немало загрязняющих веществ, из них есть преобладающие, например, технологическая пыль, которая получается после сжигания топлива, а также нефелиновый шлам, который выходит после переработки нефелина, осадок при этом тем больше, чем хуже сырье. Выбор правильного сырья в производстве алюминия является крайне важным, так как оно в большей степени влияет на уровень загрязнения источником вредных соединений. При этом следует учитывать как химический состав, так и физические свойства сырья, чтобы минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Еще одними опасными и вредными веществами, которые получаются при производстве алюминия, являются фтористые соединения. Хотя они не получаются напрямую во время электрохимического процесса получения алюминия, их образование происходит во время испарения и разложения расплава электролита и фтористых солей, которые загружаются во время процесса. Улетучивание электролита и загруженной фторидной соли происходит из-за того, что пыль, выбрасываемая из аккумуляторной батареи, содержит часть твердого фторида. Вторым источником измельченного фторида является соль, которая механически уносится восходящим потоком анодного газа или газовой смеси, выходящей из электролизера.

Из всего выше сказано можно заключить, что в настоящее время, в современном мире, тенденция развития алюминиевой промышленности

заключается в поиске и внедрении экологически безопасных и эффективных технологий производства алюминия.

## **1.2 Краткая информация о производстве алюминия в России**

На российских заводах технология получения первичного алюминия в основном используется в электролизерах с верхним пределом подачи тока.

Компания включает в себя следующие производственные мощности и мастерские:

- Электролитическое производство;
- Литейное производство;
- Производство анодов;
- Место транспортировки глинозема и фторгидрина;
- Участок по производству фторгидрина и пылегазоулавливающих устройств;
- Энергетический цех;
- Железнодорожная мастерская.

Производство первичного алюминия осуществляется путем электролиза криолитоглиноземистых расплавов с последующим производством полуфабрикатов из первичных алюминиевых сплавов, непрерывной разливки, металлов и сплавов.

Процесс производства алюминия заключается в использовании электролиза ванн, которая представляет собой электрохимический реактор с анодами, расположенными вертикально, наполненных расплавленным алюминиевым оксидом и флюсами.

Производство алюминия в электролизере происходит следующим образом:

1. Подготавливаются материалы - алюминиевый оксид, флюсы и кокс.
2. Материалы загружаются внутрь электролизера через верхнюю часть.



3. Кокс, разложенный на нагревательной ступени, создает высокую температуру для плавки алюминиевого оксида.

4. Постепенно в нижнюю часть ванны начинает стекать этот алюминиевый оксид после плавки, где с ним происходит процесс электролиза.

5. При прохождении электрического тока через расплавленный алюминиевый оксид происходит химический процесс редукции, который приводит к выделению драгоценного металла. Производится сбор готового металла.

6. Жидкий алюминий откачивается из ванны и отправляется на дальнейшую обработку в другие участки цеха.

Электролизер с самообжигающимися анодами представляет собой некоторые преимущества, такие как более эффективное использование энергии, экономия затрат и более простой процесс. Однако из-за применяемых флюсов и возможности выброса шлака этот метод может создавать некоторое загрязнение окружающей среды. Также его использование может быть невозможно из-за недостаточного доступа к сырью или электроэнергии.

### **1.3 Основные направления энергосбережения в электролизном производстве**

На данный момент, мероприятия, запланированные для повышения энергетической эффективности, представляют собой целый комплекс активно используемых технологий.

Для достижения этой цели применяются три основные группы мероприятий:

- Первая группа - интенсивное энергосбережение. Это включает в себя целый ряд мер, направленных на уменьшение газонаполненности электролита и улучшение системы обеспечения электроэнергией электролизера в целом. Идет повышение интенсивности и скорости получения алюминия из глинозема, за счет скорости растворения и

повышения редкости анодных эффектов. Для полного закрепления эффекта энергосбережения, начинают осуществлять модернизацию алгоритмов управления производством.

- Вторая группа - энергетическая модернизация. Главная задача этой группы мероприятий фокусируется на создании и применении ранее не используемых в производстве материалов, такого как графит или антрацит-графитовый блок для облицовки кожуха катода. Для обеспечения модернизации совершенствуют ошиновка на контактных узлах электроцепи и вносятся изменения в конструкцию электролизера.
- Третья группа – это меры по утилизации. Для улучшения утилизации в первую очередь охлаждают газы, так как они выходят из электролизера и удаляются по газовому тракту, на что идут затраты по электроэнергии, но при уменьшении температуры газов, снижается их физический объем и, следовательно, энергопотребления при его транспортировке. После охлаждения газа образуется теплота, которую можно использовать вновь, к примеру, для охлаждения воды, которая понадобится в дальнейшем на нужды производства.

Рассмотрим эти группы подробнее, чтобы лучше рассмотреть технические решения.

### **Первая группа**

В процессе электролиза газосодержащий слой в электролизере препятствует передаче напряжения, что ведет к увеличению расхода электроэнергии. При использовании электролизера с обожженным анодом падение напряжения на газосодержащем слое может достигать от 149 до 351 мВ. Однако, при использовании анода самообжигающегося наблюдается еще более значительное падение напряжения, около 400 мВ и больше. На преодоление сопротивления газосодержащего слоя затрачивает большую часть потребляемой электроэнергии: для обожженного анода это показатель лежит в районе от 550

до 750 кВт·ч/т алюминия, в то время как для самообжигающегося анода этот показатель еще выше – между 1150 и 1350 кВт·ч/т алюминия.

В электролизере с обожженным анодом эта проблема снижения содержания газообразного электролита может быть решена путем выполнения продольных или поперечных канавок с наклоном или без него на поверхности анода, участвующей в процессе, данное решение проиллюстрировано на рисунке 1.

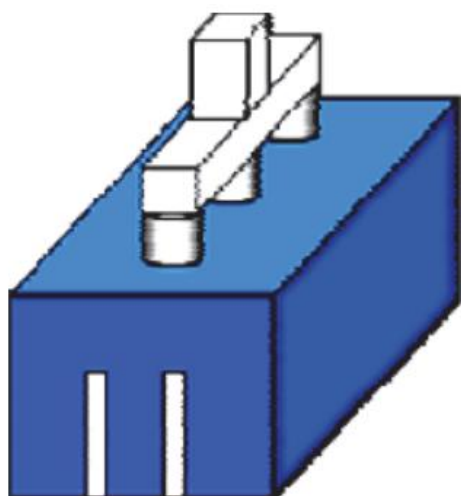


Рисунок 1 – Анод с пазами продольной формы

Благодаря такой конструкции обеспечивается меньшее расстояние транспортировки пузырьков газа к нижней кромке анода, а также увеличивается скорость прохождения электролита в центре электролизера, что повышает растворимость оксида алюминия. Использование продольно наклоненных щелей в аноде обеспечивает выход газа к центру ячейки, снижая тепловую нагрузку и улучшая условия для образования защитных отложений и выступов. Кроме того, перемещение газа электролизера в центр позволяет более эффективно улавливать газ системой удаления газов, тем самым улучшая экологические показатели производства электролита. Продольные канавки также снижают скорость потока электролита и его турбулентность в области зоны связи металла

и электролита. Это снижает повторное окисление металлов, которые растворены в электролите.

В настоящее время не найдено достаточно эффективного технического решения по снижению газосодержания электролизера с самообожженным анодом. Неэффективным решением является запекание в корпусе анода труб, по которым отводится газ, и установка коробов из стальных пластин. Он уменьшает содержание газа в электролите и таким образом нечасто повреждает оболочку электролита, что снижает тепловыделение в ячейке и потерю солей фтора. Но введение коробов приводит к уменьшению полезной площади анода, создает сложности в подаче электролита в постоянном режиме без перерывов и еще больше увеличивает риск закупорки выхлопной трубы электролитом.

Еще одним решением было предложено формировать на боковой поверхности анода вертикальный карман из сегментообразной трубы, что дает снижение потерь сырья и улучшает условия вывода анодных газов, но такой способ влечет за собой уменьшение площади анода, малый объем карманов, недостаточный для сбора фторида водорода, который образуется при загрузке в расплав глинозема.

## **Вторая группа**

Одним из направлений модернизации алюминиевых электролизеров является использование антрацито-графитовых, графитовых и графитизированных блоков для футеровки кожуха катода вместо антрацитовых. Использование графита в роли наполнителя в шихте углеграфитовой продукции дает существенный прирост эксплуатационных свойств подовых и бортовых блоков, то есть кажущейся и истинной плотности, стойкости к натриевому расширению и окислению, теплопроводности [8].

При использовании графита потери теплоты через днище и боковые стенки катодного кожуха, температура изоляции кирпичом и горизонтальные токи в расплаве металла растут. От использования графита прослеживаются

существенные колебания поверхности расплавленного алюминия, что сокращает выход по току, из чего можно сделать вывод, что применение графитизированных блоков является экономически непривлекательным. Так что, для экономии на электричестве, когда используется графитизированные блоки, необходимо значительно изменить строение анодов и бортов электролизера. Такое легче всего сделать при постройке новых заводов и разработке новых современных моделей электролизеров на повышенную силу и плотность анодного тока.

Существенных снижений расходов электроэнергии добились в Китае, благодаря энергетической модернизации с помощью установки на подины электролизеров продольных или цилиндрических выступов.

### **Третья группа**

Мероприятия данной группы направлены в основном на снижении физических объемов газов, которые идут по газоходным сетям и очищаются в газоочистных установках.

Для целей повышения эффективности применяют рукавные фильтры, которые имеют сильные ограничения по температуре очищаемых газов, обычно 140...160 °С, с возможностью работать на 170 °С не более 5...10 мин. При увеличении температуры очищаемых газов, из-за десорбции фтористого водорода с глинозема, эффективность работы газоочистной установки снижается.

Самым распространенным способом охлаждения анодных газов является разбавление атмосферным воздухом. Данный вариант чаще всего используется для переохлаждения газов после поверхностных теплообменников и, в условиях, когда увлажнения газов в скрубберах из-за увеличения точки росы нежелательно.

Впрыск воды в поток, как еще один способ, дает охлаждение газов на 10...30 °С, но это влечет за собой необходимость постоянного мониторинга состояния системы распыления воды.

Другой способ охлаждения заключается в установке кожухотрубчатого теплообменника в нижней части реактора газоочистки. Вода подается в межтрубное пространство, а газ идет в трубное, охлаждаясь в радиусе между 50 и 60 °С. Компания Hydro из Норвегии разработала новую концепцию теплообменника, представляющего собой пучок эллиптических ребристых труб, в которых в межтрубном пространстве протекает горячий газ, а в трубках – теплоноситель. Компания Alstom разработала горизонтальный теплообменник, который использует до 25 мВ тепла анодного газа от каждого электролизера, которое затем используется для производства энергии.

#### **1.4 Основные направления повышения экологической безопасности оборудования**

Существует еще одно наиболее важное направление повышения экологической безопасности алюминиевого производства – это внедрение электролизеров с предварительно обожженными анодами. Однако в настоящее время в российской алюминиевой промышленности около 60 % металла выходит из электролизеров на самообжигающихся анодах, а производство алюминия на данных электролизерах сопровождается с собой высоким уровнем выбросов загрязняющих веществ. Причина в том, что за последние 25 лет электролизеры этого типа были значительно модернизированы, в результате чего производительность увеличилась на 20...25 %. Напротив, система сбора анодного газа, откачки и дожигания (система дегазации) электролизеров с самообожженным анодом не увидела никаких серьезных изменений с момента её создания, и это произошло на фоне значительного увеличения силы тока от конструкции (156 и 175–180 кА) в настоящее время сопровождаются повышенным образованием и выбросами загрязняющих веществ.

Конструкция газоудаления представляет из себя:

- газосборный колокол (ГСК) – секции из чугуна установлена вокруг анодного кожуха и вместе с его боковой поверхностью создают канал, через который собираются и выводятся анодные газы;
- установленные на угловых секциях ГСК горелочные устройства, сжигающие горючие компоненты анодного газа, такие как – СО, смолистые вещества и бензпирен;
- соединяющую электролизеры и газоочистные установки газоходную сеть, которая представляет собой систему комплексных газоходов длиной в масштабах корпуса электролиза 2...2,5 км.

В результате производства 1 тонны алюминия вместе с ним образуется в среднем около 300...400 килограмм оксида углерода, 16...20 килограмм диоксида серы и 35...50 килограмм фтористых соединений. Обеспечить соответствующий современным экологическим требованиям уровень выбросов, возможно только при улавливании более 95 % этих веществ системой газоудаления электролизера и направлением на обезвреживание в газоочистные установки. На самом деле этот показатель намного ниже, так как в течение последних 10...15 лет была существенно увеличена производительность электролизеров, в основном делая это за счет повышения амперной нагрузки процесса электролиза.

При таком подходе произошло увеличения объема анодных газов до 42...45  $\text{нм}^3/\text{ч}$ , в отличие от старого показателя, который был равен примерно 35  $\text{нм}^3/\text{ч}$  объема анодных газов, а система газоудаления не подверглась каким-либо изменениям, что негативно сказалось на экологических показателях производства алюминия. Так, например, увеличение силы тока приводит к изменению баланса фтора в расходных материалах и увеличению содержания фторидов в газе, поступающем в систему дегазации, до 10...15 кгФ/т алюминия, что в конечном итоге приводит к общей потере фтора и увеличению выбросов. Увеличение силы тока изменяет тепловую нагрузку на анод, а также вызывает расслоение анодного блока после его нагружения с образованием пековых

отложений на поверхности анода и налипанием крупных частиц кокса на агломерационный конус, утечку пека под штифты могут привести к тому, что дно анода и отверстия образуют трещины, которые ухудшают условия, при которых образующийся анодный газ направляется из-под анода в колокол.

### **1.5 Выводы по главе 1 и постановка задач работы**

Главной проблемой в отрасли производства алюминия в России можно назвать отсталость систем газоудаления, так как при усовершенствовании и повышении мощностей производства в основном затрагивалась конструкция самого электролизера, а газоудаление практически не менялось, оставаясь практически на одном и том же уровне, следовательно основным способом повышения эффективности и экологичности производства является проектирование и совершенствование системы газоудаления алюминиевого электролизера, благодаря которому можно повысить процент удаления газов и улучшить его переработку.

Цель исследования – повышение эффективности газоудаления в электролизере.

Задачи бакалаврской работы:

- Изучить принцип работы и конструкцию электролизера и системы газоудаления.
- Рассмотреть и сравнить конструкции секций ГСК с установленной изоляцией и без неё.
- Рассмотреть объемы теплоты на работу электролизера и технические решения использования теплоты сгорания анодных газов.
- Рассмотреть более рациональные решения конструкции газоходной сети.
- Проанализировать эффективность газоходной сети с применением предложенных решений.



## **2 Оборудование и процессы производства алюминия**

### **2.1 Общие сведения о конструкциях электролизеров различных типов**

Электролизер представляет собой тепловой агрегат, осуществляющий механизм превращения воды путем электрического воздействия в элементарные составляющие – водород и кислород

Электролизеры различаются по типу электролита, типу электродов, формату ячеек и способу подачи электрического тока.

В общем виде любой электролизер можно представить следующим образом. Неглубокие шахты (ванны электролизеров) заполнены расплавом жидкого алюминия и электролита. Это несмешивающиеся жидкости, расположенные по определенной плотности: алюминий внизу и электролит сверху. Угольный анод опускается в электролит. Катод представляет собой поверхность жидкого алюминия на дне резервуара. В тонком слое электролита между анодом и катодом происходит электролиз оксида алюминия с выделением алюминия на катоде и кислорода на аноде, где происходит окисление углеродного анода.

Над расплавом (на границе с воздухом) образуется затвердевшая электролитная оболочка, покрытая глиноземным наполнителем. Слой затвердевшего электролита покрывает (переливается, нарастает) с внутренней стороны боковых стенок ванны.

Каждый электролизер, даже при разных конструкциях и мощностях состоит из следующих элементов:

- Катодное устройство;
- Анодное устройство;
- Ошиновка электролизера;
- Опорная металлоконструкция;
- Укрытие электролизера;

– Механизм для автоматического питания глиноземом (АПГ).

Одним из самых распространенных типов электролизеров является щелочной электролизер. Он работает на электролите на основе гидроксида натрия или калия и имеет два электрода – анод и катод. Катодом обычно является пластина из никеля, а анод – из серебра или платины. В результате электролиза на катоде образуется водород, а на аноде – кислород.

Еще одним типом электролизеров являются мембранные электролизеры. Они используют мембрану для разделения анода и катода и сохранения электролита. Мембраны могут быть различных типов – катионообменные, анионообменные или способные к разделению.

Есть также электролизеры высокой температуры, которые работают на твердом электролите. Они способны производить водород при температуре более 1000 градусов и могут быть использованы в производстве сжатого водорода.

На данный момент применяются данные технологии электролиза:

- производство алюминия с использованием предварительно обожженных анодов на электролизерной установке или технология ОА-электролиза;
- производство алюминия с использованием самообжигающихся анодов на электролизерной установке, по-другому называется электролизер Содерберга.

В отличие от электролизеров с обожженными анодами, самообжигающиеся имеют разную конструкцию и принцип работы, так, например, существует подвод тока сбоку и сверху, соответственно БТ и ВТ.

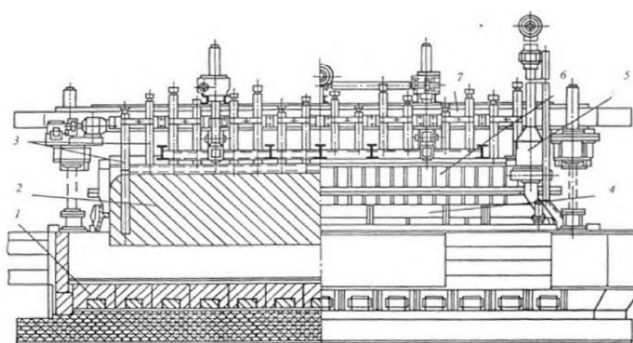
## **Электролизер ВТ**

Токоведущие штыри на электролизерах ВТ устанавливаются вертикально, чтобы способствовать спеканию анодной решетки при опускании. Если нижний конец штыря достигнет расстояния от основания анода, которое определено

безопасностью технологического процесса (не менее 20 см), то штырь будет извлечен из корпуса анода.

Катодный блок электролизера ВТ имеет стальной кожух, который облицован угольными топочными блоками и окружен огнеупорными и теплоизоляционными материалами. Для отвода тока от пода были отлиты чугунные плиты на стальных стержнях в нижней части подовых блоков, перед их установкой в электролизеры. Подовые блоки заполняют шов между подовым блоком и периферийным швом.

Анодный узел электролизера ВТ состоит из графитового анода, размещенного в стальном корпусе, анодной шины и анодных стержней для подвешивания анода и подвода тока. Внизу корпуса анода и по его периметру на специальном поясе из чугунных деталей подвешен газосборный колокол. Колокол свисает с ремней корпуса анода и действует как газосборник для сбора смешанного газа из-под анода.



1 — катодные угольные блоки; 2 — анодный массив;  
3 — анодный токоведущий штырь; 4 — колокольный газосборник;  
5 — горелочное устройство; 6 — анодный кожух; 7 — анодная шина

Рисунок 2 – Технология электролизера ВТ

В процессе электролиза, анодный газ выводится из ВТ при помощи колокольной системы газосбора и горелки. Для сбора газа используется колокол-газосборник, который изготавливается из чугунных профилей и прикрепляется к поясу корпуса анода. В нижней части помещается глиноземная засыпка, которая обеспечивает герметичность всего устройства. Анодный газ собирается под

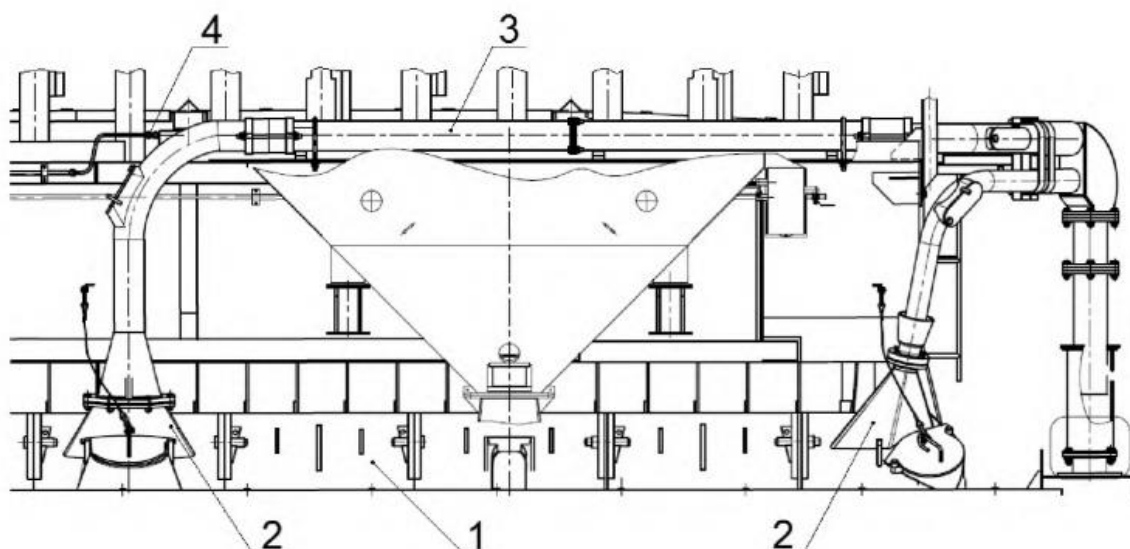
газосборником и направляется в горелку, где он под давлением сжигается, преобразуя оксид углерода и смолистые частицы в безопасные продукты.

Разработка новой конструкции электролизера ВТ является частью проекта «Создание экологически приемлемой и конкурентоспособной технологии электролиза с использованием анодов Содерберга». Проект Эко-Содерберг включает практически все объемы работ, связанные с производством алюминия, а именно:

- технологию и оборудование по производству анодной массы;
- технологию изготовления и конструкцию катодного узла;
- технологию анода и электролиза с современной автоматизированной системой управления системой;
- комплекс мероприятий по дожигу и удалению газов от электролизера;
- автоматизированные системы по транспортировке и питанию электролизера сырьем;
- механизмы, устройства и инструменты, исключаящие или снижающие долю ручного труда в обслуживании электролизера [5].

К новым техническим и технологическим решениям конструкции электролизера «Эко-Содерберг» относятся:

- устройство электролизеров С-8БМ(Э) и С-8Б(Э) с новым безгорелочным газосборным колоколом и новой системой газоудаления;
- новый технологический инструмент, средства механизации, новые технологические практики для обслуживания данных электролизеров;
- технология производства и использования анодной массы с низким содержанием связующего [5].



- 1 — газосборный колокол электролизера;
- 2 — сборные купола системы газоудаления;
- 3 — трубопроводы системы удаления газов;
- 4 — продувка системы удаления газов

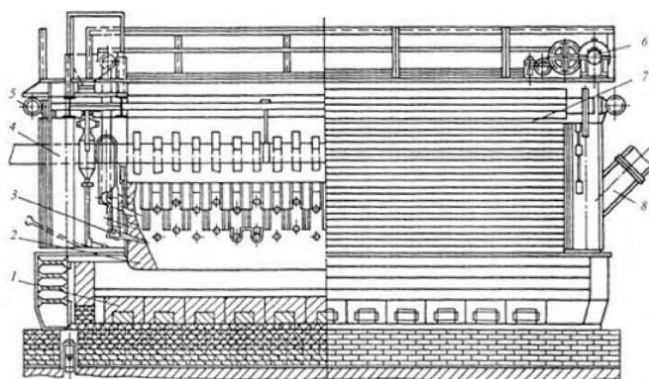
Рисунок 3 – Система газоудаления электролизера «ЭкоСодерберг»

## Электролизер БТ

Конструкция катодного узла на электролизере БТ очень похожа на стандартный электролизер ВТ. Анодный узел состоит из стальных анодных стоек, которые подвешиваются к металлической конструкции при помощи системы тросов и цепных талей. Если анод выгорает и опускается, то рамка анода держится на том же расстоянии вместе с ним. Нижние два ряда контактов являются токоведущими, а для соединения с анодными шинами используются медные или алюминиевые капли. Анодные штыри вставлены под углом в стороны верхней области анодной решетки, и их перемещение происходит вместе с анодом к более горячей зоне внизу, где они спекаются с коксовым массивом. Когда нижний конец штифта выходит из корпуса анода и входит в контакт с электролитом, штифт извлекают и перемещают в верхний слой. Окружающая среда места расположения электролизера БТ имеет укрытие, которое используется для сбора вредных веществ, выделяющихся во время

электролиза. Защитный кожух монтируется на раме с воздухозаборным колоколом вверху и шторами (сворачивающимися, откидными и т.п.) со стороны электролизера.

Различные типы электролизеров имеют разные методы извлечения анодного газа, образующегося в процессе электролиза. В электролизере БТ вся установка ограничена корпусом электролита и боковыми сторонами анода и покрыта слоем. Анодный газ, содержащий горючую окись углерода, отводится через специально расположенные отверстия в корпусе электролита «лампы». При этом горючие компоненты анодного газа выгорают, а продукты сгорания удаляются вместе с всасываемой из электролизера газовой воздушной смесью.



- 1 — катодные угольные блоки; 2 — анодный массив;  
3 — анодный токоведущий штырь; 4 — анодная шина;  
5 — механизм подъема штор; 6 — механизм перемещения анода;  
7 — шторное укрытие; 8 — патрубок отсоса газов

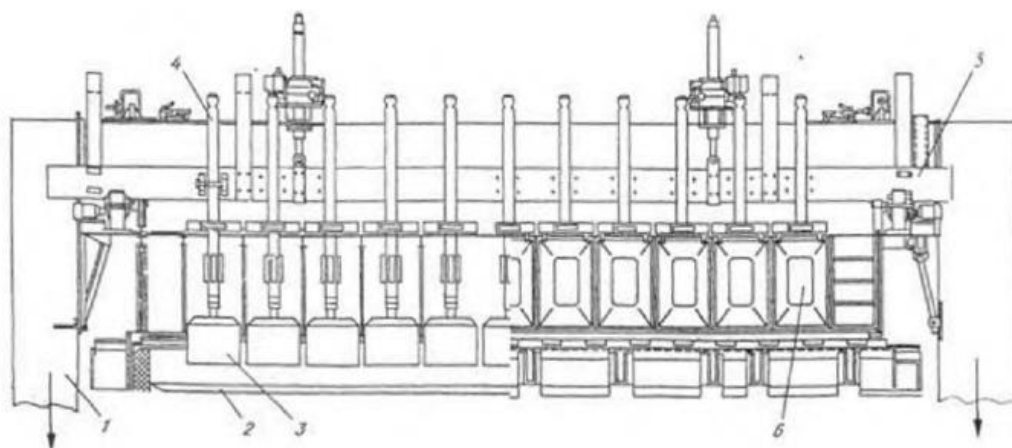
Рисунок 4 – Электролизер БТ

## Электролизер ОА

Электролизеры ОА имеют отличительную конструкцию анодного узла, по сравнению с предыдущими электролизерами ВТ и БТ. Каждая ячейка содержит массив из нескольких анодов, количество которых зависит от их размера.

Аноды представляют собой формованные и прессованные углеродные блоки, проходящие обжиг при температуре 1100–1200 °С. После обжига аноды можно установить в анододержатели и далее доставить на электролизную

установку. Алюминиевые стержни, прикрепленные к анододержателям, соединяют аноды с анодными шинами. Для удержания их на месте используются специальные зажимы и стальные шарниры, отлитые из чугуна. Анодная решетка может подниматься с помощью подъемного механизма для перемещения на батарею. Крышки электролизера ОА предназначены для сбора и удаления образующихся вредных веществ. Направить газ на улавливание ценных компонентов и регенерацию фтористых солей.



1 — анодная шина; 2 — катодное устройство; 3 — ОА;  
4 — анодные штанги; 5 — анодная рама; 6 — створки укрытия

Рисунок 5 – Электролизер ОА

## 2.2 Современные проекты по модернизации заводов России

На данный момент существует и приводится в действие проект по модернизации КрАЗа, направленный на более эффективное и экологичное производство алюминия.

На заводе используется технология получения первичного алюминия на электролизерах с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом. Объем производства алюминия на существующий период составляет 1015 тыс. т/год.

Проект реконструкции АО «РУСАЛ Красноярск» предусматривает вывод из эксплуатации нескольких электролизных корпусов (№13 и 23) и на их месте

возведение двух современных корпусов электролиза с обожжёнными анодами, оснащенных электролизерами РА-550, которая позволит, в частности, исключить выбросы бензапирена в процессе электролиза алюминия в новых корпусах, а также существенно снизить выбросы фтористых газообразных соединений.

Электролизер РА-550 способен при силе тока 530 кА выдавать выход по току 95,8 %, а расход электроэнергии 12897 кВт · ч на тонну алюминия

После реализации проекта увеличение производительности предприятия по алюминию не планируется.

В состав проектируемых объектов входят:

1. Электролизное производство, включая: корпуса электролиза «А» и «Б», централизованную раздачу глинозема, воздуходувные станции, циркуляционные и соединительные коридоры, трансбордерный коридор с проходным тоннелем сетей инженерно-технического обеспечения, пешеходную галерею, здание административных помещений.

2. Анодное производство, включая: анодно-монтажное отделение (АМО), отделение переработки электролита, отделение дробления огарков, склады, узел отгрузки анодной массы на ДАМ.

3. Газоочистные установки (ГОУ), включая ГОУ №1, ГОУ №2, участок выведения сульфатов из растворов ГОУ.

4. Транспорт сырья, включая: склады глинозема и фторсолей (СГФ) №№ 2 и 3, а также узлы загрузки технологических кранов корпусов «А» и «Б».

5. Ремонтное производство, включая: цех чистки и ремонта ковшей, цех ремонта грузоподъемных кранов, склад металлоизделий, цех капитального ремонта электролизёров, отделение выбойки электролизёров.

6. Электроснабжение, включая: закрытое распределительное устройство (ЗРУ) 220кВ, кремниевую преобразовательную подстанцию, распределительные пункты 10 кВ, комплектные трансформаторные подстанции (КТП), межцеховые кабельные сети, внешнее электроснабжение, воздушную линию ВЛ 220кВ ПС Енисей-ЗРУЭ 220 кВ.



7. Прочие объекты: ограждение завода, автодороги, промплощадка, благоустройство и т.д.

Целью этого проекта является реконструкция действующего Красноярского алюминиевого завода с сохранением объёма выпуска алюминия с одновременным снижением нагрузки на окружающую среду, в том числе за счет сокращения выбросов таких значимых загрязняющих веществ как бензапирен, диоксид серы и фтористые газообразные соединения.

Эффективное снижение экологической нагрузки основано на переводе значительной части производственных мощностей КрАЗ с технологии «Содерберг» на технологию электролиза с применением обожжённого анода, с пуском в эксплуатацию новейшей серии электролизёров РА-550 [5].

### **2.3 Конструкция системы газоудаления**

Система газоудаления электролизера с самообжигающимся анодом включает в себя три основных компонента:

1. газосборный колокол (ГСК) для сбора анодных газов, образующихся в процессе электролитического получения алюминия;
2. горелку для дожигания горючих компонентов анодного газа;
3. газоходную сеть, по которой термически обезвреженные анодные газы транспортируются на окончательную очистку в газоочистные установки.

#### **2.3.1 Газосборный колокол электролизера с самообжигающимся анодом**

Колокол для сбора газа является основным элементом и первой ступенью для сбора анодного газа, образующегося в процессе производства электролиза алюминия. Его эффективность работы является фактором, определяющим выбросы фтора, а также эффективность блока горелки.

При разгерметизации ячейки эффективность вытяжки по улавливанию анодного газа падает до 60 %, а по фтороводороду — до 35 %. Средняя заданная продолжительность разгерметизации аккумулятора составляет 2 часа в сутки — это время, необходимое для очистки от отложений пространства под раструбом.

Выбросы загрязняющих веществ при отгрузке глинозема обусловлены способом подачи загрязняющих веществ системой ПНГ - извне ГСК, где значительная часть образующейся пыли и фтористого водорода выбрасывается в атмосферу резервуара.

Известные конструкции ГСК условно можно разделить на три типа:

1. безгорелочные для дожигания анодных газов непосредственно в подколольном пространстве;
2. предотвращающие (сокращающие) деформацию пояса анодного кожуха, на которые навешиваются секции ГСК, и увеличивающие срок службы нижней, самой быстроизнашиваемой части анодного кожуха;
3. повышающие эффективность сбора и дожигания анодного газа в горелочных устройствах [9].

Безгорелочные ГСК промышленного применения не нашли, потому что избыточное давление анодных газов в подколольном пространстве сопровождается их выбиванием в атмосферу через отверстия, предназначенные для подсоса атмосферного воздуха.

Техническим решением по предотвращению деформации кожуха анода является обеспечение герметичности между нижней кромкой внутренней стенки ГСК и ней. Для этого секции колокола имеют «смещенный центр тяжести» в сторону кожуха анода, либо между кожухом анода и лентой устраивают полость, заполненную теплопроводным материалом, например бетоном, для предотвращения перегрев компонентов. Но при этом увеличивается общая масса анодного узла и увеличивается нагрузка на домкрат анодной рамы. Профили ГСК из алюминия или его сплавов позволяют значительно снизить эту нагрузку, но из-за его низкой температуры по сравнению с расплавом рабочая температура не превышает 150 °С, что значительно ниже температуры газосборника в

рабочем состоянии. электролизера, до сотен градусов, а в контакте с расплавом электролита – до 950 °С и выше, они также не нашли применения в промышленности.

Детали ГСК из порошкообразных материалов (спекшийся корунд или оксид алюминия, алюминиевая пудра и жидкое стекло в качестве связующего) еще не нашли промышленного применения. Изготовленные таким образом газосборные колоколы обладают высокой термостойкостью до 2000 °С, а также инертностью к агрессивным анодным газам. Использование этого ГСП снижает поступление железа в батарею, а низкая теплопроводность порошкового материала позволяет значительно уменьшить потери тепла с верхней части батареи.

При рассмотрении конструкций ГСК можно сделать вывод, что ни одна из них не была направлена на решение проблемы снижения образования отложений в пространстве под колоколом, что является основной причиной сброса газов в рабочую зону. звание выбрасывается в атмосферу через аэрационные лампы. Повышенная частота засорения колокольного пространства брызгами обусловлена его малым объемом и площадью поперечного сечения, что не соответствует достигнутым характеристикам ячейки и объему образующегося анодного газа. На ходовой батарее площадь поперечного сечения 0,05 м<sup>2</sup>, и в четырех точках на ней имеются "точки заземления" площадью поперечного сечения 0,0375 м<sup>2</sup>, расположенные под укрытием системы ПНГ. Они существуют из-за необходимости загрузки глинозема в ячейку в точке максимальной циркуляции электролита. Именно эти места в подколокольном пространстве чаще всего забиваются отложениями из-за глиноземной пыли при загрузке глинозема в электролизер.

Отсюда известные конструкции ГСК нельзя рассматривать как перспективные, решающие проблему повышения экологической безопасности электролизеров для получения алюминия.

### 2.3.2. Горелочные устройства дожигания анодных газов

Горелка является первой ступенью нейтрализации горючих компонентов анодного газа. От того, насколько эффективно они работают, зависит количество выбрасываемого в атмосферу углекислого газа и смолы. При этом следует учитывать, что угарный газ, оказывающий сильное негативное воздействие на человека, в горелке только нейтрализуется, в отличие от дополнительного улавливания смолистых веществ в газоочистных сооружениях.

С конструктивной точки зрения горелочное устройство выглядит как цилиндрическую камеру сгорания с отверстиями для подачи воздуха и патрубками подачи воздуха. Анодный газ, поступающий в горелку, смешивается с атмосферой, вызывая самовозгорание угарного газа и органических веществ.

Щелевые горелки наиболее распространены, поскольку они наиболее просты по конструкции, надежны, относительно недороги в производстве и просты в обслуживании. Однако, по данным металлургических предприятий, суммарная степень догорания горючих компонентов в анодном газе составляет 85-90%, что недостаточно для обеспечения соблюдения норм выбросов. Это связано с тем, что желобная горелка является постоянно-точной, и ингредиенты в ней не смешиваются искусственно, а горение в природе в основном диффузионное.

Согласно, техническому регламенту горелка работает с избытком воздуха  $\alpha = 6$ , что во много раз превышает рекомендуемое значение для сжигания газообразного топлива. Избыток воздуха охлаждает горелку и снижает температуру зоны горения, увеличивая при этом количество газа, удаляемого из камеры сгорания системой газоудаления, а также энергозатраты на доставку газа по сети. Большие объемы газа требуют более мощного газоочистного оборудования.

Температура зоны горения в основном зависит от избытка воздуха  $\alpha$ . Превышение  $\alpha > 3,5$  приведет к снижению температуры зоны горения до уровня, недостаточного для обеспечения самовозгорания CO при смешивании с

воздухом. Температура, достаточная для полного вторичного сгорания гудрона, наблюдалась менее чем в 10 % от общего числа работающих горелок. Это связано с разным расстоянием электролизеров от газоходов под поперечным корпусом, скудностью горелок и количеством всасываемого в них воздуха.

Температура в горелке повышается по мере удаления от боковых газоходов ниже кожуха, но из-за отсутствия разреженности ее входных щелей можно регулярно наблюдать попадание пламени в рабочую зону электролитического кожуха.

Слишком много всасываемого воздуха может охладить газы сгорания до температуры, недостаточной для поддержания их воспламенения при смешивании с воздухом.

На входе в горелку температура анодного газа находится в пределах от 250 до 700 °С, в среднем 470 °С, что ниже температуры воспламенения при смешении с воздухом.:

1. У  $CO$  температура воспламенения – 610 °С;
2. У  $CH_4$  температура воспламенения – 645 °С;
3. У  $H_2$  температура воспламенения – 510 °С.

Еще одной проблемой, возникшей при эксплуатации горелки, было образование отложений пыли в прямоугольных патрубках угловой секции ГСК, где была установлена горелка. Отложения могут блокировать поступление анодного газа в горелку, вызывая гашение горения.

Причинами образования отложений являются:

1. газ, отбираемый под газосборным колпаком, имеет высокое содержание пыли;
2. скорость воздуха в сопле низкая, а расход воздуха недостаточен для полного уноса частиц пыли;
3. аэродинамическое сопротивление прямоугольного сопла большое, а также это "застойная" зона с плотным скоплением пыли.

Проблема, связанная с повышением эффективности вторичного сжигания анодных газов, можно решить с помощью модернизации существующих

горелочных устройств и разработки новых конструкций. Однако подавляющее большинство этих разработок оказались труднореализуемыми и не привели к серьезным прорывам в решении проблемы термической очистки анодных газов. Например, нагрев воздуха, подаваемого в зону горения, теплом корпуса катода увеличивает тепловые потери на его поверхности, требуя дополнительных энергетических затрат на их компенсацию.

Использование и установка горелок таких типов (триплексных и с теплообменниками) вынуждает расходовать дополнительный бюджет на изготовление и техническое обслуживание.

На основании обзора способов сжигания анодных газов и конструкций горелок можно сделать вывод, что технических решений, которые отвечают экологическим требованиям, существующим в данный момент, пока не было найдено.

### **2.3.3 Газоходные тракты корпусов производства алюминия и способы их обслуживания**

Газоходные тракты представляют собой сложные сети, которые могут иметь длину до 2-2,5 км внутри корпуса электролиза. На рисунке 6 показаны типовые схемы сетей. Горячие газы, в смеси с атмосферным воздухом, подсасываемым в горелки, проходят через пылесадительные камеры и спуски, за счет разрежения, которое создается дымососами, и поступают в продольные и поперечные ветви газоходов. По мере движения газов в газоходах, они охлаждаются и движутся в ГОУ. Четыре ветви продольных газоходов соединяются с поперечным газоходом, образуя бригаду.

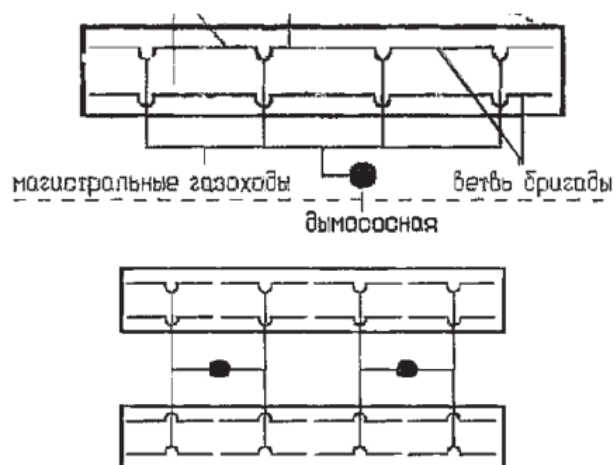


Рисунок 6 – Типовые схемы газоходных сетей

В электролизном корпусе имеется четыре бригады. Поперечные подкорпусные газоходы соединяются с межкорпусными газоходами. Регулируемые шиберы установлены на выходе из-под корпуса, чтобы выровнять объемы газоудаления и разрежения между бригадами. Однако, такой способ регулировки не гарантирует равномерности разрежения и газоудаления в горелочных устройствах и не обеспечивает стабильность горения

Спусковой и продольный подкорпусные газоходы между соседними агрегатами снабжены электроизолирующими вставками или разрывами, обычно из термостойкой ткани и жести.

Необходимость их использования обусловлена спецификой алюминиевого электролитического производства и требованиями техники безопасности.

Вставки могут деформироваться и выгорать под воздействием высоких температур. Через образовавшийся свищ могут происходить несанкционированные утечки в атмосферу, снижающие эффективность газоудаления из электролизера и повышающие энергозатраты газовых выбросов и нагрузку на ГОУ.

Частицы пыли и смолоподобные вещества, содержащиеся в транспортируемом газе, оседают в газопроводе. Одной из причин образования отложений является полидисперсность пылевых частиц: оксида алюминия от 4 до 50 мкм в зависимости от степени износа в «сухих» газоочистках; фторида

алюминия - до 160 мкм; частиц анодного углерода. - до 210 - 310 мкм, способствуя их плотной агрегации с образованием комков размером до 600 мкм и более, которые впоследствии оседают на стенках газопроводов. Из-за увеличения объема отложений полезное сечение газовых труб уменьшается, а их сопротивление увеличивается.

Часто применяемым способом очистки дымовых каналов от нагара является периодическое использование сжатого воздуха для выталкивания осевшей пыли. На Красноярском заводе, который занимается производством алюминия, этот метод реализуется при помощи механизма, состоящего из прямоугольных коленчатых труб, размещенных в центральной газовой трубе. Форсунки на концах труб направлены против текущего потока, образуя свободные струи воздуха. Начиная с тупика газопровода продувку проводят последовательно. Такой подход имеет ряд недостатков, к числу которых необходимо отнести дополнительное аэродинамическое сопротивление, создаваемое соплом из-за отрыва потока от сопла при обтекании. Турбулентность, создаваемая за соплами, способствует дополнительному осаждению пыли. Последовательная продувка газопроводов — длительный процесс, длящийся до 1 часа и более в масштабах электролизной установки и требующий значительных человеческих ресурсов. При продувке газопроводов горелки отключаются (горение гасится высокоскоростной струей воздуха через входные щели горелок), а анодный газ в эти периоды отводится без вторичного горения.

На Новокузнецком алюминиевом заводе продолжительность операции меньше, так как газовая труба продувается по всей ее длине одновременно. Сжатый воздух подается по трубе под углом к направлению движения газа. Верхняя часть газопровода оборудуется патрубками с равномерным шагом не более 2 м, а нижняя часть горелки продувается одновременно с газопроводом. Система приводится в действие «единственным клапаном», расположенным рядом с местом, где работает батарея. Способом управления системой может быть очистка газопроводов при накоплении отложений, например определяемая



по гашению пламени горелки в случае нарушения схемы газоудаления. Недостатком этой системы является высокая запыленность транспортируемой газоздушнoй смеси из-за одновременного взмучивания осевшей пыли по всей длине газопроводной сети.

Заслуживают внимания и системы автоматического удаления отложений из газоходов некоторых электролизных цехов Братского алюминиевого завода. Система активируется через заданные промежутки времени с помощью пневматического электрического клапана, расположенного в нагревательной камере, для предотвращения замерзания конденсата в сжатом воздухе зимой. Воздух подается в трахею через быстроразъемный шланг, закрепленный в коллекторе, который установлен под углом примерно 30° к оси трахеи. Коллектор предлагает возможность визуального контроля состояния трахеи с помощью индикаторов или измерительных полосок. У этой системы был и недостаток – отсутствовали устройства для удаления конденсата из сжатого воздуха, что приводило к образованию «мокрых» отложений, что требовало ручного удаления и предварительной разгерметизации газопроводов. В эти периоды анодный газ из электролизеров выбрасывается в рабочую зону электролизного корпуса.

На Красноярском алюминиевом заводе очистили отложения в газовых трубах на днище корабля, израсходовав около 300 миллионов кубометров сжатого воздуха в год на сумму более 22 миллионов рублей. Влажность этого воздуха составляет от 2,0 до 16 мкг/м<sup>3</sup>, что может негативно сказаться на состоянии сети и эффективности газоудаления. Диоксид серы и фтористый водород, содержащиеся в выхлопных газах, при контакте с влагой образуют сернистую и плавиковую кислоты, вызывающие коррозию, что приводит к преждевременному износу дымохода. Пыль, смоченная вытекающим конденсатом, налипает на стенки газоходов, что приводит к их шероховатости, аэродинамическому сопротивлению и увеличению энергоемкости газового разряда. Образующееся в дымоходе ограждение является изолятором, препятствующим передаче тепла от выхлопных газов через стенки в

окружающую среду. Более высокие температуры также увеличивают затраты энергии на выбросы газов, учитывая, что газы намного более вязкие, чем более холодные газы.

Другие, менее распространенные методы (ультразвуковые и различные химические) также применяются для очистки от отложений в газопроводах, но они сложны в приборостроении и имеют значительные капитальные и эксплуатационные затраты.

Конструкция сети газопроводов аэродинамически несовершенна, так как содержит большое количество тройников, диффузоров и поворотов, которые в совокупности создают высокое сопротивление, достигающее порядка 600 Па в бригадном масштабе и более 2200 Па для электролизных установок. До 15% мощности, вырабатываемой дымососом, тратится на преодоление сопротивления в сети газопровода.

Аэродинамическое несовершенство сетей заключается в следующем:

- неоднородные углы входа при спусках от 45 до 90° в подкорпусные газопроводы;
- имеются участки резкого расширения потока (выход из тупиковой горелки бригады выходит в подкорпусной газопровод диаметром в 1,5...1,8 раза больше диаметра выхода);
- несанкционированная утечка воздуха через пылеотстойники и электроизоляционные вставки;
- неправильно установлены диффузоры (как правило, они устанавливаются в местах, не совпадающих с местами стыков потоков);
- Непостоянные (неравномерные) расходы из-за неправильного подбора диаметров газопроводов;
- Несоосность (смещение) соседних участков газопровода, что увеличивает гидравлическое сопротивление в среднем на 25%.

Следствием сетевых аэродинамических недостатков является то, что количество газа, удаляемого от горелок, различно, в зависимости от их удаления

от поперечных газоходов под кузовом эта величина может варьироваться в 2-3 раза.

Это может привести к неэффективной работе горелки или пропуску зажигания, поскольку для стабильного горения важно обеспечить равномерный поток выхлопных газов из каждой горелки. Снижение полноты сгорания сопровождается увеличением поступления смолистых веществ и угольной пыли в газоходы и последующим их отложением на стенках газоходов.

Неоднородный газовый поток также может образовывать отложения из-за неправильного выбора диаметра участка газопровода под кожухом.

Фактическая стоимость большинства линий природного газа намного выше, но все равно образуются отложения. Это можно объяснить прилипанием или прилипанием частиц к стенке и коагуляцией из-за липкости смолистого вещества, основная часть которого содержится в мельчайших частицах. Образование отложений происходит из-за наличия застойных зон в газопроводных системах, характеризующихся острыми и неравномерными углами входа, внезапным расширением проходных и проходных площадей, приводящих к интенсивному отложению пыли и других углеводородов. Эти отложения приводят к коррозии, ограничению воздушного потока и повышенному потреблению энергии насосом.

Есть несколько известных способов выравнивания объемов удаления газов от электролизеров:

- установка на спусках конусных вставок;
- применение шиберов (местное регулируемое сопротивление) после горелок на спусках;
- установка на спусках стационарных диафрагм (постоянное местное сопротивление);
- применение поворотных диафрагм в местах присоединения горелки к газоотводящим газоходам;
- использование трубы Вентури на спусках (постоянное местное сопротивление);

- увеличение диаметров подкорпусных газоходов ветви до 600 - 1 000 мм для снижения коллекторного эффекта (газоходы «равномерного всасывания»);
- выполнение спусков из труб различного диаметра (регулирование за счет сопротивления трения).

Опыт показал, что при низкой скорости газа даже во всасывающей линии это приводит к более быстрому образованию отложений. Вставки Вентури и конические вставки требуют больших капиталовложений, чем отверстия. Установка выдвижных регулирующих затворов и вращающихся диафрагм требует особенно трудоемких измерений при монтаже. Но ни один из этих вариантов не используется.

Чтобы предотвратить осаждение пыли на стенках газохода можно повысить скорость газового потока. Устойчивость прохода частиц пыли, входящих в транспортируемые по газоходным сетям анодные газы, достигается повышением скорости потока, минимальная скорость при этом должна составлять 15 м/с.

Эта величина может быть определена по формуле Л.С. Клячко:

$$V_{\text{тр}} = 1,3\sqrt[3]{\rho_{\text{м}}}, \quad (2.1)$$

где  $\rho_{\text{м}} = 1550 \text{ кг/м}^3$  – средняя насыпная плотность пылевых частиц, содержащихся в транспортируемых анодных газах [10].

Чтобы обеспечить такую скорость нужно снизить диаметры газоходов, а именно, спусков от горелок со 159 до 100 мм, с уменьшением диаметров подкорпусных и межкорпусных газоходов в 1,5 - 2 раза.

Для достижения равномерного объема дегазации зарубежные алюминиевые заводы правильно выбирают диаметр воздухопровода, тройник и конструкцию патрубка, обеспечивающие наименьшее аэродинамическое сопротивление, за счет уменьшения длины некоторых сетевых патрубков и применения регулирующих устройств. Для уменьшения несанкционированной

перекачки по длине газопровода электроизолирующие зазоры достигаются за счет полной герметизации.

## **2.4 Вывод по главе 2**

В данной главе, на основе изученного материала, был достигнут следующий результат:

1. Были рассмотрены разные конструктивные виды электролизеров, их принцип работы, различия, преимущества и недостатки.
2. Проанализированы текущие проекты модернизации, план работ и конструктивные решения, которые будут вводиться в работу.
3. Изучен принцип работы системы газоудаления, конструкция каждого элемента системы отдельно, были отмечены недостатки системы, которые можно изменить или модифицировать для общего повышения эффективности.

### **3 Усовершенствование системы газоудаления электролизера**

#### **3.1 Расчетный анализ потерь теплоты поверхностями алюминиевого электролизера**

Процесс передачи теплоты от элементов электролизера в окружающую среду проблематичен из-за сложной конфигурации тепловыделяющих поверхностей, различных условий движения воздуха для очистки поверхностей, различных параметров лучистого теплообмена. Расчет этих потерь осложнен значительными погрешностями определения температуры теплоотводящих поверхностей и теплофизических свойств изоляционного материала.

Гидродинамические процессы играют важную роль в тепломассообмене. Относительно большими количествами электролита глинозем обедняется и движется с достаточно высокой скоростью, чтобы отводить значительное количество тепла от центральной области расплава, обратный поток которого транспортирует растворенный глинозем в межполярное пространство.

При выполнении анодирования из расплава выделяется большое количество тепла, которое должно быть отведено в окружающую среду. Передача тепла происходит через верхнюю часть электролизера, от анодного узла до корпуса и газа, который выводится через систему удаления газов. Электролизер с самообжигающимся анодом имеет потери в 216 кВт теплоты, что составляет порядка 28% от общих потерь в окружающую среду. Газосборный колокол также является потенциальным источником потери тепла на примерно 35 кВт, что составляет 16% всех потерь через его верхнюю часть или 4,5% от всех тепловых потерь. Чтобы компенсировать такие потери, требуется затратить до 300 кВт·ч/т алюминия электроэнергии. Если использовать колокол с увеличенной площадью наружной поверхности, то это может привести к увеличению потерь тепла через анодное устройство и, как следствие, затрачивать больше энергии для компенсации потерь.

Из-за конструкции новых ГСК с повышенным объемом пространства под колоколом и площади поверхности снаружи, на заводах по производству алюминия, растет потеря теплоты и через анодное устройство и энергии, чтобы это компенсировать.

Конструктивно ГСК представляет собой однослойную стенку, где тепловые потери через нее теплопроводностью  $Q_T$ , конвекцией  $Q_K$  и излучением  $Q_L$  приближенно можно оценить с использованием уравнений, где определяющим фактором является градиент температуры в рассматриваемой системе теплообмена:

$$Q_T = \frac{F\lambda}{\delta} (t_{ст1} - t_{ст2}); \quad (3.1)$$

$$Q_K = a_k F (t_{ст} - t_o); \quad (3.2)$$

$$Q_L = \varepsilon C_o F \left[ \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \varphi, \quad (3.3)$$

где  $F$  – площадь внешней стенки ГСК,  $m^2$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки,  $Вт/(м \cdot К)$ ;  $\delta$  – толщина стенки,  $м$ ;  $t_{ст1}$  и  $t_{ст2}$  – температура внутренней (горячей) и наружной (холодной) поверхностей стенок,  $^{\circ}C$ ;  $t_{ст}$  и  $t_o$  – температура стенки и окружающей среды,  $^{\circ}C$  ( $К$ );  $\varepsilon$  – степень черноты тела;  $a_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ;  $C_o = 5,67 \text{ Вт}/(м^2 \cdot К^4)$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\varphi$  – угловой коэффициент взаимного облучения системы тел [8].

Проанализировав уравнения можно сказать, что снизить потери теплоты ГСК возможно за счет оснащения его стенок многослойной тепловой изоляцией с высоким тепловым сопротивлением

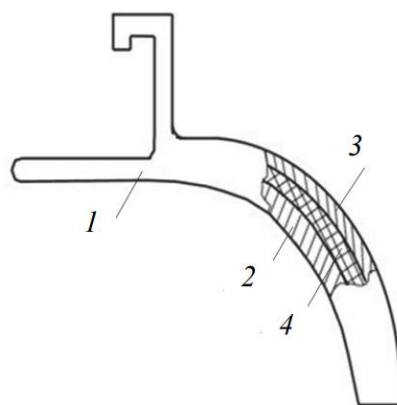


Рисунок 7 – ГСК с установленной на него тепловой изоляцией: 1 – секция газосборного колокола; 2, 3 – внутренняя и наружная стенки секции; 4 – тепловая изоляция

Изоляция может быть добавлены в процессе отлива или установлены на внешней поверхности кожуха, который защищает их от расплавленного металла или электролита, а также от технологических инструментов. В качестве идеального материала для теплоизоляции можно выбрать вспученный вермикулит, который имеет теплопроводность, эквивалентную традиционным материалам, таким как стекловата и асбестовые листы, с коэффициентом  $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , что значительно ниже, чем у материала, из которого изготовлена часть колокола из литого железа, на более чем 1200 раз. Кроме того, вермикулит обладает термостойкостью до  $1200^\circ\text{C}$ , что в 2,5 раза выше, чем у традиционных материалов для изоляции. В отличие от других изоляционных материалов, которые могут оказывать негативное воздействие на организм человека при вдыхании, вермикулит не имеет запаха и не вызывает раздражения, что делает его безопасным и экологически чистым выбором для теплоизоляции.

В качестве теплоизоляционных материалов могут также использоваться воздух и газы с низкой теплопроводностью, такие как аргон, ксенон и криптон, или поглощающие тепловое излучение экзотермических поверхностей., например,  $\text{CO}_2$ .

Оборудование ГСК с тепловой изоляцией было проверено на эффективность на действующем электролизере ОАО «РУСАЛ Красноярск». Испытания проводились зимой, средняя температура наружного воздуха  $-30^\circ\text{C}$ .



Поверхностей секций ГСК и их температура отражены на рисунке 8. В итоге замеров температур для испытаний была избрана секция № 6, которая покрыта тепловой изоляцией в виде листового асбеста толщиной 8 мм, в качестве сравнения – секция № 7. Секции находятся на лицевой стороне и имеют одинаковые температуры внешней стенки.

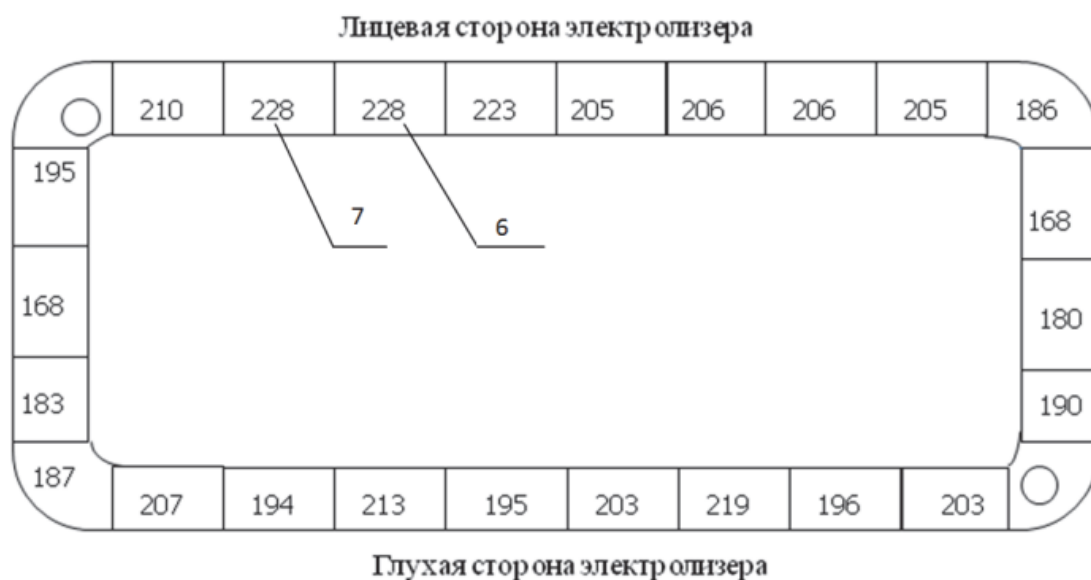


Рисунок 8 – Температура поверхностей газосборного колокола электролизера

Для измерения температуры использовался бесконтактный инфракрасный термометр Thermopoint, оснащенный лазерным целеуказателем. Диапазон измерения температур составлял от -50 до +1050 градусов Цельсия, а погрешность измерения варьировалась в зависимости от диапазона температур: от -20 до 200 °C погрешность составляла  $\pm 1,5\% \pm 2$  °C, а от 200 до 538 °C составляет  $\pm 2\% \pm 2$  °C. Время реакции инфракрасного термометра было не более одной секунды.

Результаты моделирования тепловых процессов под газосборным колоколом на рисунке 9 позволили температуру внутренней горячей стороны стенки.



Рисунок 9 – Поле температур в поперечном сечении подколокольного пространства

При выходе из анода, газ нагревается свыше 900 °С, однако в подколокольном пространстве происходит его значительное охлаждение благодаря конвективному теплообмену со стенками ГСК. При этом температура внутренней поверхности ГСК колеблется в пределах от 250 до 400 °С.

По результатам измерений температур поверхностей секций ГСК, которые отображены на рисунке 10, можно заключить, что температура на поверхности теплоизолированной секции оказалась более чем на 100 °С ниже, чем на поверхности обычной секции.



Рисунок 10 - Температура поверхностей газосборного колокола электролизера, с учетом установки теплоизоляционного слоя на сектор №6

Для расчета секций используются формулы (3.1, 3.2 и 3.3)

Расчет секции без теплоизоляции (№7), кВт:

$$Q_T = \frac{F\lambda}{\delta} (t_{ст1} - t_{ст2}) = \frac{0,5 \cdot 66}{0,02} (523 - 501) = 30250 = 30,25.$$

$$Q_K = a_K F (t_{ст} - t_o) = 52 \cdot 0,5 (501 - 293) = 5408 = 5,408.$$

$$Q_L = \varepsilon C_o F \left[ \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \varphi = 0,6 \cdot 5,67 \cdot 0,5 \left[ \left( \frac{501}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] \cdot 1 = 946,3 = 0,946.$$

Расчет секции с теплоизоляцией (№6), кВт:

$$Q_T = \frac{(t_{ст1} - t_{ст2})}{F \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)} = \frac{(523 - 403)}{0,5 \left( \frac{0,02}{66} + \frac{0,008}{0,157} \right)} = 16240 = 16,240, \quad (3.4)$$

где  $F$  – площадь поверхности ГСК,  $m^2$ ;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности стенки из чугуна и изоляции из асбеста,  $Вт/(м \cdot К)$ ;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – толщина стенки из чугуна и изоляции из асбеста,  $м$ ;  $t_{ст1}$  и  $t_{ст2}$  – температура внутренней (горячей) и наружной (холодной) поверхностей стенок,  $^{\circ}C$ ;  $t_{ст}$  и  $t_o$  – температура стенки и окружающей среды,  $^{\circ}C$  ( $K$ );

$$Q_{K(\text{чугун})} = a_K F (t_{ст} - t_o) = 52 \cdot 0,5 (403 - 293) = 2860 = 2,86;$$

$$Q_{K(\text{асбест})} = a_K F (t_{ст} - t_o) = 12 \cdot 0,5 (403 - 293) = 660 = 0,66;$$

$$Q_{K(\text{суммарно})} = 2,86 + 0,66 = 3,52.$$

$$Q_L = \varepsilon C_o F \left[ \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \varphi = 0,95 \cdot 5,67 \cdot 0,5 \left[ \left( \frac{403}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] \cdot 1 = 323 = 0,323.$$

Оценка потерь тепла от обычной и изолированной секций была рассчитана и сравнена с помощью уравнений. Для расчета теплового потока была использована площадь наружной поверхности ГСК секции, которая составила  $0,5 m^2$ . Согласно проектной документации, толщина стенки секции составляет  $20$  мм, а толщина слоя изоляционного материала (асбестового картона) –  $8$  мм. Коэффициенты теплопроводности чугуна и асбеста были установлены из справочных данных и составили  $66,0$  и  $0,157$   $Вт/(м \cdot К)$  соответственно. Коэффициенты теплоотдачи для чугуна и асбеста были установлены на уровне  $52$  и  $12$   $Вт/(м \cdot К)$  соответственно.

Расчеты показали, что потери теплоты ГСК с использованием обычной секции составляют около  $36$  кВт, секции, оборудованной тепловой изоляцией, –

20 кВт, то есть в 1,8 раза ниже. Соответственно, удельный расход электроэнергии на компенсацию этих потерь снижается с 250...280 до 130...150 кВт·ч/т алюминия.

### 3.2 Расчетный анализ энергетических затрат на эксплуатацию газовой сети корпуса электролиза

На данный момент, в России, в основном, используются электролизеры с самообжигающимися анодами. Общее аэродинамическое сопротивление газовой сети проходов электролизной установки, по которым анодный газ из установки отводится в установку газоочистки, составляет около 2 кПа. На преодоление этого сопротивления уходит примерно 20 % мощности, которую вырабатывают вентиляторы радиального типа (дымососы), которые являются частью системы газоудаления. Одним из решений против аэродинамического сопротивления сети являются тройники с соблюдающимся условием равной суммы площадей  $F_{\Pi}$  и  $F_6$ , прямого участка и бокового ответвления, и площади  $F_c$  сборного рукава, при этом угол ввода  $\alpha$  бокового ответвления в собираемый рукав равняется  $30^\circ$ .

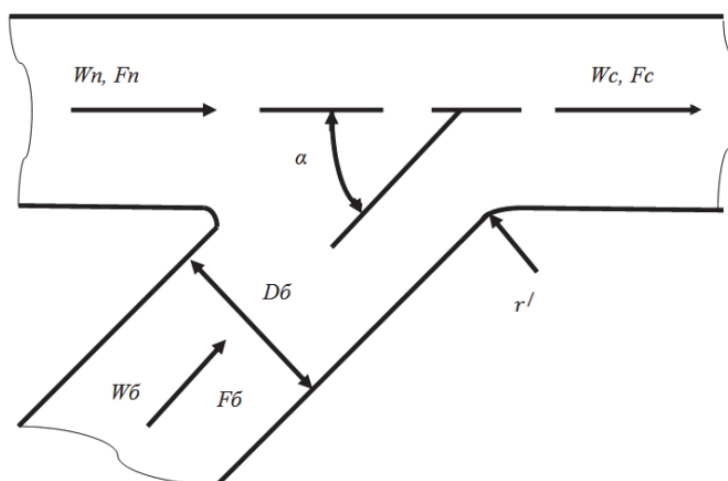


Рисунок 11 – Тройник для осуществления слияния потоков

При подборе угла ввода угловых ответвлений было определено, что сопротивление тройников зависит от данного угла, так как, при соблюдении условия  $F_{\Pi} + F_{\Gamma} = F_{\Sigma}$  уменьшение угла с 90 до 60° снижает сопротивление тройника в 1,5 раза, а если угол уменьшается до 45, 30 и 15°, то, соответственно сопротивление изменяется в 2; 2,5 и 3 раза.



Рисунок 12 – Визуальное отображение изменений сопротивления тройника при различных углах ввода бокового ответвления и соблюдении условия  $F_{\Pi} + F_{\Gamma} = F_{\Sigma}$

Как можно заметить, использование угла ввода бокового ответвления значением 15 - 30° обеспечит в сравнении с существующей газоходной сетью 1,5 - 3-кратное снижение энергетических затрат на преодоление их сопротивления (с 16 - 18 до 4 - 10 кВт·ч/т алюминия).

Уменьшение углов ввода боковых ответвлений также благоприятно повлияет на снижение образований пыли в застойных зонах. Чаще всего удаление объемов газа от электролизеров неравномерное и имеет прерывистый характер, чтобы обеспечить равномерность газоудаления можно применить регулирующие устройства, например, шиберы и поворотные заслонки.

Удельные объемы газов, которые удаляются от электролизеров с самообжигающимися анодами, составляют около 12-15 тыс. м<sup>3</sup>/т алюминия, на транспортировку этих газов по газоходной сети затрачивается электроэнергия,

примерно 58 кВт·ч/т алюминия. Оптимальным путем снижения энергетических затрат на транспортировку будет регулирование разрежения в газовой сети, для этого можно использовать дисковые затворы. В случае затвора, после внезапного сжатия происходит внезапное расширение потока.

Кроме внезапных сужений и расширений наблюдаются сложные повороты потока, которые связаны с повышением скоростей в определенных точках, отделение потока от стенок трубы, препятствий и вихрей.

Кинетическая энергия турбулентности  $k$  растет при увеличении скоростей, потому что полностью зависима от показателей скоростей:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u}^2 + \overline{v}^2 + \overline{w}^2, \quad (3.16)$$

где  $u$ ,  $v$  и  $w$  – компоненты скорости относительно осей координат.

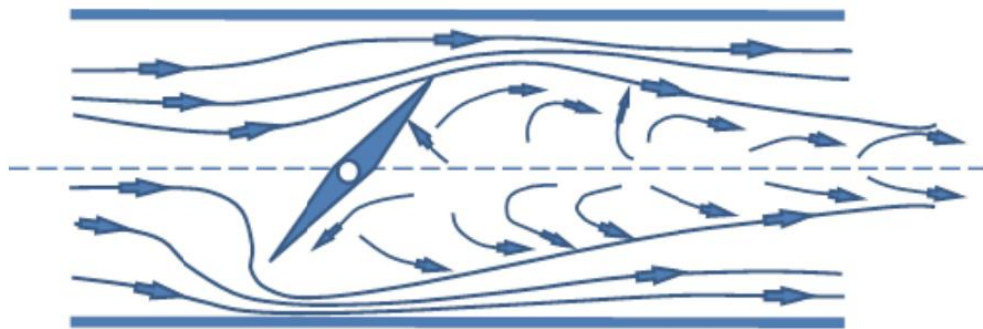


Рисунок 13 – Движение потока с обтеканием установленного дискового затвора

Дисковой затвор может иметь разное сопротивление, так как оно связано с степенью открытости затвора и отражено в уравнении:

$$\xi \sim \frac{120}{Re} \frac{1 + 0,5 \overline{D}_r (1 + \sin \delta)}{(1 - \overline{D}_r^2 \sin \delta)^2} + \left(1 - \frac{50}{Re}\right) \left(\frac{1,56}{1 - \overline{D}_r^2 \sin \delta} - 1\right)^2, \quad (3.17)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\overline{D}_r = \frac{D_r}{D_k} = 0,98$ ;  $D_r$  – диаметр зоны горения (внутренний диаметр горелочного устройства), м;  $D_k$  – диаметр дискового затвора, м;  $\delta$  – угол, образованный плоскостью затвора и вертикальной осью горелочного устройства, град [8].

### 3.3 Технические решения по утилизации теплоты процесса электролиза

Объем тепла  $Q_{Al}$ , которое нужно на нагрев и растворение порции глинозема подаваемой в электролизерную установку, находится из уравнения теплового баланса:

$$Q_{Al} = dQ_1 + dQ_2 + dQ_3 + dQ_4 + dQ_5 = 359 + 222 + 229 + 424 + 401 = 1635 \text{ кДж/кг}, \quad (3.5)$$

где  $dQ_1$  – теплота на нагрев всей порции глинозема;  $dQ_2$  – теплота на испарение влаги в глиноземе;  $dQ_3$  – теплота для фазового преобразования глинозема из  $\gamma$ -фазы в  $\alpha$ -фазу;  $dQ_4$  – теплота на растворение глинозема;  $dQ_5$  – теплота на нагрев глинозема до температуры электролита[8].

Отдельные элементы теплового баланса определяются по следующим соотношениям:

$$dQ_1 = C_{\Gamma} M_{\Gamma} dT_{\Gamma} = 0,840 \cdot 91 \cdot 10 = 359 \text{ кДж/кг}; \quad (3.6)$$

$$dQ_2 = 14670 \Delta m_{Al} = 14670 \cdot 15,16 = 222 \text{ кДж/кг}; \quad (3.7)$$

$$dQ_3 = 185000 \chi_{\gamma} \Delta m_{Al} = 185000 \cdot 0,46 \cdot 15,16 = 229 \text{ кДж/кг}; \quad (3.8)$$

$$dQ_4 = dH_{\text{раств}} n \Delta m_{Al} = 78956 \cdot 10 \cdot 15,16 = 424 \text{ кДж/кг}; \quad (3.9)$$

$$dQ_5 = C_{\Gamma} \Delta m_{Al} (T_{\text{э}} - T_{\Gamma}) = 0,840 \cdot 15,16 \cdot (750 - 10) = 401 \text{ кДж/кг}, \quad (3.10)$$

где  $M_{\Gamma}$  – масса глинозема, загружаемой в электролизер, кг;  $\Delta m_{Al}$  – масса глинозема, растворившегося в электролите за время  $\Delta t$ , кг;  $\chi_{\gamma}$  – доля гамма-фазы в глиноземе;  $C_{\Gamma}$  – теплоемкость глинозема кДж/т·°С;  $T_{\Gamma}$  – температура глинозема, °С;  $n$  – число молей в килограмме глинозема;  $T_{\text{э}}$  – температура электролита[8].

Количество теплоты, Дж/моль, необходимое для растворения порции глинозема, определяется с помощью формулы [7]:

$$dH_{\text{раств}} = 78962 - \frac{139729}{\%Al_2O_3 + 514826 \cdot e^{-\%Al_2O_3}} = 78962 - \frac{139729}{3 + 514826 \cdot 2,718^{-3}} = 78956 \quad (3.11)$$

Каждая тонна произведенного алюминия требует 1920 кг глинозема и потребляет около  $1,635 \cdot 10^6$  кДж/т электрической энергии на электролизерной установке, что эквивалентно  $81,75 \cdot 10^3$  кДж/ч теплоты. Восполнение этих

энергетических потерь требует от 420 до 450 кВт·ч электроэнергии, что составляет 4% от общего потребления.

При этом теплота сгорания углерода и анодного газа отводится в систему газоудаления в количестве, сравнимом с затратами на нагрев глинозема. Термодинамические расчеты в табл. 1 подтверждают это утверждение.

По представленным зависимостям можно найти показатель теплового эффекта при сгорании углерода на аноде  $Q_{\text{ан}}$  и количество теплоты, которое уносится с газами анода  $Q_{\text{газ}}$ :

$$Q_{\text{ан}} = P_{\text{CO}_2} \Delta H_T^{\text{CO}_2} + P_{\text{CO}} \Delta H_T^{\text{CO}}; \quad (3.12)$$

$$Q_{\text{газ}} = P_{\text{CO}_2} \Delta H_{T_2 \text{CO}_2}^{T_1} + P_{\text{CO}} \Delta H_{T_2 \text{CO}}^{T_1}, \quad (3.13)$$

где  $P_{\text{CO}_2}$  и  $P_{\text{CO}}$  – количество  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , которое образуется в электролизерной установке;  $\Delta H_T^{\text{CO}}$  и  $\Delta H_T^{\text{CO}_2}$  – энтальпии реакций окисления углерода;  $\Delta H_{T_2 \text{CO}_2}^{T_1}$  и  $\Delta H_{T_2 \text{CO}}^{T_1}$  – изменение энтальпии  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  в интервале температур от  $T_2$  до  $T_1$  в результате реакций:





Таблица 1 – Количество теплоты, выделяющейся в процессе сгорания анодов электролизеров силой тока 156 и 175 кА и уносимой в систему газоудаления с анодными газами.

Эффективность	Количество образующихся анодных газов, кг/ч				Энтальпии реакций (3.13) и (3.14), МДж/ч		Теплота, уносимая в систему газоотсоса, МДж/ч		Затраты теплоты на нагрев и растворение глинозема, кДж/ч
	CO <sub>2</sub>		CO		Электролизер силой тока		Электролизер силой тока		
	156	175	156	175	156	175	156	175	
0,98	41,3	49,6	20,1	23,9	458,1	548,2	64,2	76,2	81750
0,95	43,8	52,7	19,6	23,2	492,8	573,1	66,3	78,1	
0,88	44,6	53,6	18,4	21,6	481,2	577,7	65,8	78,4	
0,85	46,9	56,2	17,7	20,9	499,1	598,2	67,7	80,5	
0,75	47,3	56,9	15,5	18,8	495,8	594,8	66,1	79,9	
0,7	49,1	59,0	14,8	17,6	507,6	608,3	66,9	79,7	
0,6	51,8	62,3	12,6	15,4	524,5	629,1	67,9	80,9	
0,5	54,5	65,8	11,2	13,1	541,3	646,4	69,1	82,1	

С увеличением силы тока тепло, выделяющееся при анодировании и подводимое в систему удаления газов, увеличивается в среднем на 20 %, что эквивалентно энергии, затраченной на нагрев и растворение загруженного в расплав глинозема. Существует возможность использовать данное тепло для разнообразных нужд производства, для повышения эффективности и экономии ресурсов, например, тепло анодного газа можно использовать для предварительного нагрева глинозема через специальный изолированный теплообменник, а именно, устанавливаемый после горелочного устройства,

противоточный кожухотрубчатый теплообменник, который также является и бункером системы АПГ.

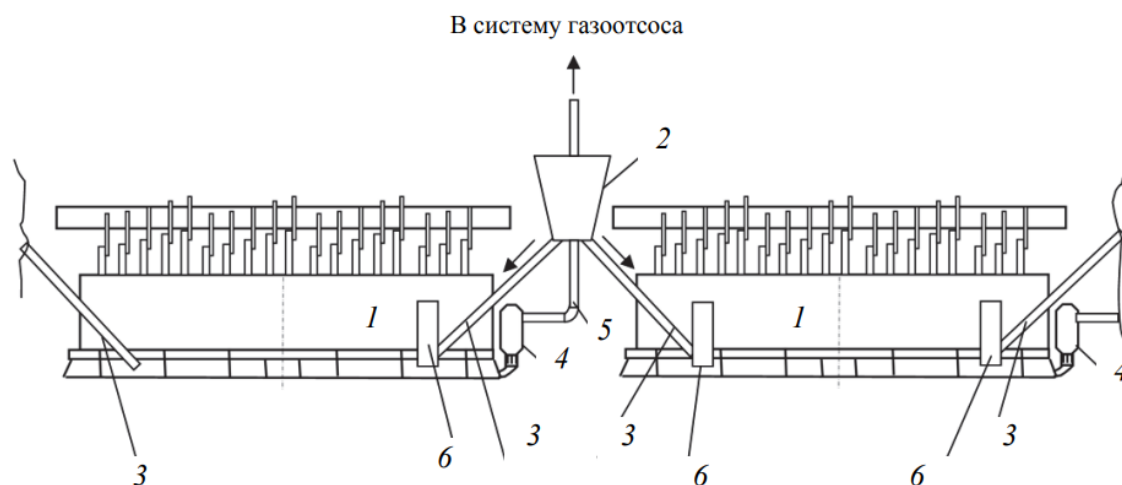


Рисунок 14 – Схема работы противоточного кожухотрубчатого теплообменника:

1 – электролизер; 2 – бункер-теплообменник системы АПГ; 3 – трубы подачи нагретого глинозема в электролизер; 4 – горелочное устройство электролизера; 5 – газоход отвода газов от электролизера; 6 – пробойник системы АПГ

Для обеспечения эффективного обмена теплом между теплоносителем и материалом нагревателя в процессе обратимой электролизной реакции на промышленном уровне, необходимо установить теплообменник вне зоны электролизера. Это позволит также обеспечить свободное движение глинозема в межтрубном пространстве, где происходит противоточный процесс, что отражено на рисунке 15, к тому же существует возможность подавать глинозем сразу на два электролизера, которые находятся рядом, данный вариант показан на рисунке 14.

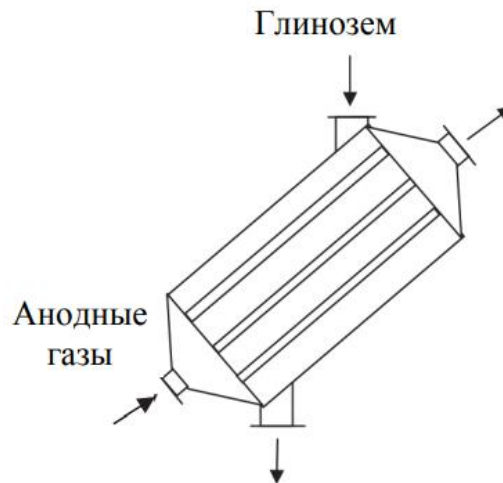


Рисунок 15 - Схема направления поток анодных газов и глинозема в бункере-теплообменнике

Установка теплообменника требует своих тонкостей, так как иначе проходы могут забиваться и глинозем не будет идти в электролизер, так, например, сам теплообменник должен быть установлен на такой высоте, при которой угол наклона трубы подачи глинозема в электролизер, будет выше угла естественного откоса глинозема, обычно равный углу между 35 и 40°, и объем при всем при этом был примерно 1,5 м<sup>3</sup>, так как это суммарный объем двух бункеров, которые эксплуатируются на КраЗе в настоящий момент. Если будет сделан такой объем, то он позволит питать ближайшие электролизеры на протяжении 2-3 дней работы, так как он даст возможность загрузить в бункер до 3 тонн глинозема.

На нагрев 3 тонн глинозема до температуры от 200 до 250 °С, нужной для повышения эффективности и скорости процесса, необходимо отдать около  $0,7 \cdot 10^6$  кДж теплоты, при этом за два дня работы устройства в него поступит  $6 \cdot 10^6$  кДж теплоты. Получается, что утилизация 15 % выделяемого количества теплоты и долгое пребывание глинозема в бункере-теплообменнике обеспечивает его прогрев до нужных температур. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду поверхности бункеров должны быть снабжены теплоизоляцией.

Этот теплообменник обладает еще одним преимуществом – он позволяет значительно сократить количество установленных бункеров в два раза. Более того, при использовании этого теплообменника в корпусе электролизера, который содержит 86 электролизеров, количество бункеров уменьшается с 350 до 190. Это значительно упрощает конструкцию и экономит место. Снятие бункеров с кожуха анодного позволит снизить нагрузку на домкрат анодной рамы от 6 до 8 тонн, что снизит расход электроэнергии на их приводы на 15 или 20 %, что равно 2,0 или 2,5 кВт·ч/т алюминия.

На основании теоретических расчетов можно сделать вывод, что предварительный подогрев глинозема может положительно сказаться на снижении энергозатрат и скорости растворения. Чтобы проверить это была использована электролизерная установка корпуса электролиза ОАО «РУСАЛ Красноярск». Во время испытаний холодный глинозем берется из силоса с определенной температурой, равной 10 °С. Чтобы замерить порции глинозема, которые брались массой 0,5 килограмм, были использованы лабораторные весы типа ВЛКТ-500г-М с пределом измерений от 0 до 500 грамм, они имеют погрешность при измерении от 1 до 20 миллиграмма. Чтобы оценить температуру глинозема, который загружался в электролизерную установку, были использованы переносные прибора «Testo 835-T2», их предел измерений находится между –40 и +500 °С, а погрешность при измерении идет от ±0,5°С до +0,5 % от измеряемого значения. Для оценки времени, уходящего на растворение, был использован электронный секундомер вида СЧЕТ-1М. Температура электролита в период до и после загрузки в него глинозема оценивается при помощи преобразователя термоэлектрического ТП 2488 его пределы измерений находятся между –40 и +1 000 °С, погрешность измерений ± 0,0074·t.

Нагрев глинозема происходил до температур 50, 100, 150, 200, 250 °С.

По результату наблюдений, помещение в электролизерную установку предварительно нагретого глинозема позволит уменьшить падение температуры электролита на 2 °С на каждое увеличение температуры глинозема на 50 °С,

благодаря чему можно заключить, что колебания температуры самого электролита подчинены линейной зависимости.

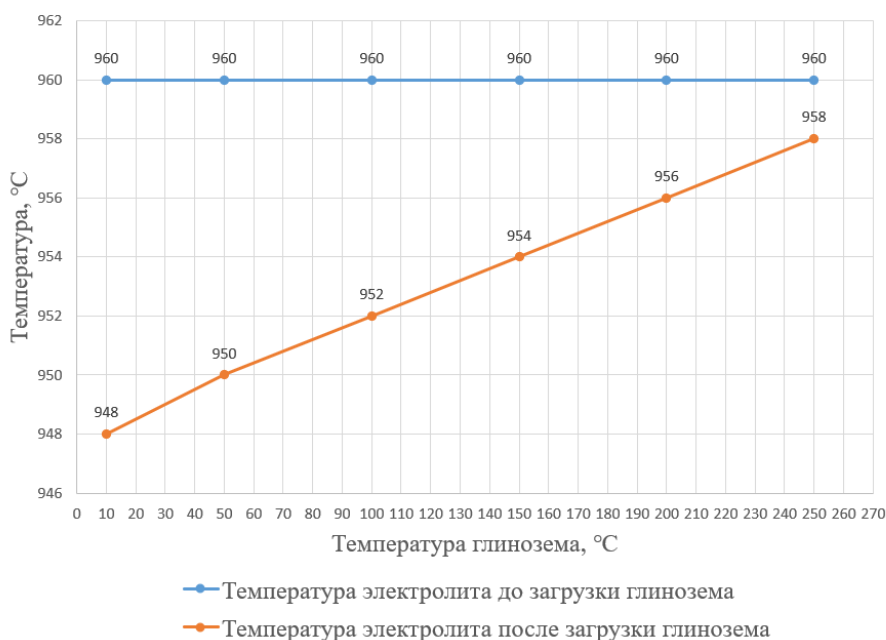


Рисунок 16 – Зависимость температуры электролита от температуры глинозема

При оценке снижения энергозатрат после загрузки в электролизер предварительно подогретого глинозема можно отметить, что каждые 50 °C нагрева глинозема приводят к снижению удельного расхода энергии примерно на 20 кВт·ч/т алюминия, получается, что при нагреве в пределах 200 и 250 °C можно получить результат в размере 80 и 110 кВт·ч/т алюминия соответственно.

Кроме того, время для полного растворения глинозема в электролите при сократилось в 1,7 раза при предварительном нагреве по сравнению с холодным. Нагрев глинозема заранее понижает время на полное растворение на 10 секунд каждые 50 °C повышения температуры глинозема.

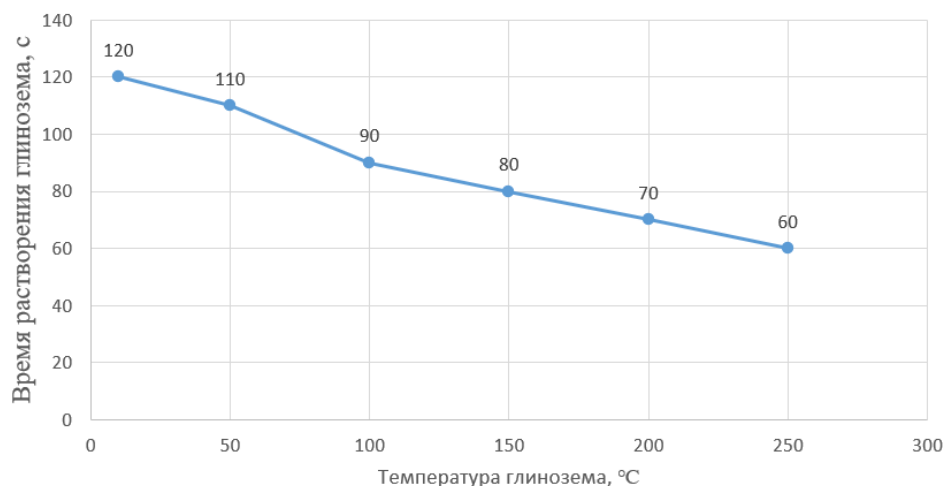


Рисунок 17 – Влияние температуры загружаемого в электролизер глинозема на время его растворения в электролите

В случае производств с использованием предварительно обожженными анодами, данное тепло может пойти на предварительный нагрев анодов, что будет способствовать сокращению расхода электроэнергии на производстве. Для данной задачи используется контейнер для расположения обожженных анодов, его боковые стенки укомплектованы теплоизоляцией.

В контейнере установлена система нагрева, которая представляет собой замкнутый гидравлический контур, соединенный с системой газоудаления. Для эффективной работы системы используется жидкость, у которой температура кипения не менее 140 °C. Система также оснащена расширительным баком и циркуляционным насосом. Внизу контейнера расположены теплопередающие устройства - радиаторы, которые обеспечивают равномерное распределение тепла. С помощью этой установки можно нагреть обожженный анод до показателей от 100 до 120°C за период от 2,0 до 2,5 часа. Кроме того, данная система нагрева является энергоэффективной и имеет минимальный негативный экологический след, что является важным критерием в выборе оборудования для производства.

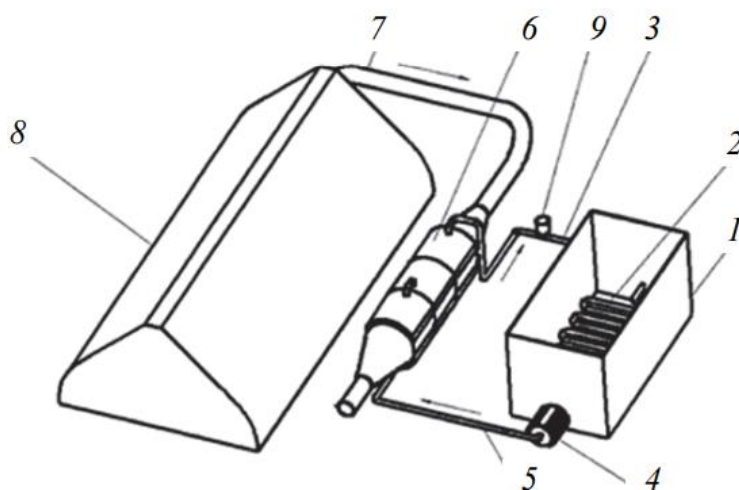


Рисунок 18 – Установка для предварительного нагрева обожженных анодов: 1 – теплоизолированный контейнер; 2 – теплопередающие устройства в виде жидкостных радиаторов; 3 – подводящий трубопровод; 4 – циркуляционный насос; 5 – отводящий трубопровод; 6 – теплопринимающие устройства; 7 – газоход; 8 – газосборное укрытие электролизера; 9 – расширительный бак

Нагрев уходящими газами электролизера лучше всего производить в двухъярусном контейнере, в нижнем ярусе которого находится огарок, а на верхнем располагается нагреваемый обожженный анод.

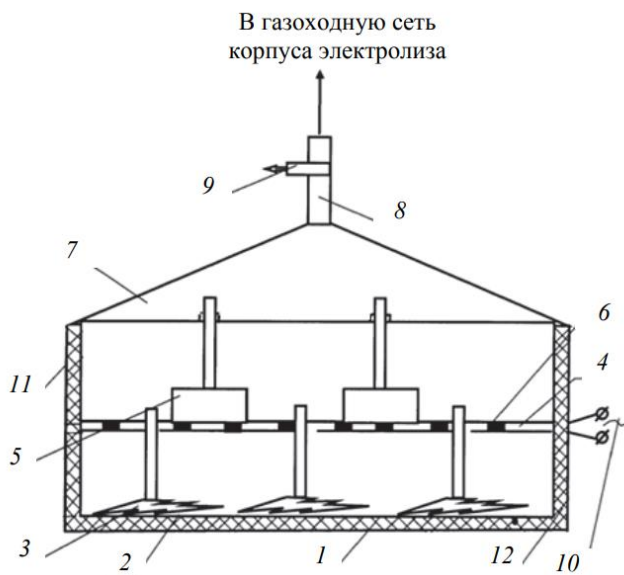


Рисунок 19 - Контейнер для герметизации анодных огарков: 1 – корпус; 2 – подина; 3 – анодные огарки; 4 – верхний ярус; 5 – свежие обожженные аноды; 6 – газопропускные окна; 7 – конусная крышка; 8 – газоотводящий патрубок; 9 – шибер; 10 – теплоэлектронагреватели; 11 – боковые стенки контейнера с теплоизоляцией 12

При процессе охлаждения анодного огарка выделяются газы, которые переносят тепло в верхний ярус контейнера через окна на нижнем уровне. Тепловые электронагреватели, расположенные под крышкой верхнего яруса, используются для нагрева обожженных анодов. Чтобы предотвратить выбросы взвешенных частиц в окружающую среду, необходимо использовать коническую крышку для идеальной изоляции охлаждаемых огарков.

При установке нагретого до 150 °С обожженного анода, достигается намного быстрее равномерность распределения тока в электролизере, то есть в следствии этого расход электроэнергии уменьшается в среднем 47 кВт·ч/т алюминия.

### **3.4 Расчет газоходной сети корпуса электролитического производства алюминия**

Чтобы смоделировать газоходную сеть и проверить все варианты конструкций, с учетом разнообразных решений и модификаций, была использована программа σNet. Благодаря этой программе есть возможность рассчитать сеть и проанализировать её с учетом разнообразных показателей, влияющих на работу.

В этой программе происходит конструирование гидравлической сети из разных составляющих, что показано на рисунке 15. Как источники выбросов в ней рассматриваются электролизеры (номера от 211 до 220 и от 224 до 233), а узлами химического реагирования предстают горелки (номера от 5 до 24 и от 31 до 50). Тройники являются узлами сети газоходов (номера от 162 до 179 и от 188 до 205), диффузорами (номера от 237 до 245 и от 249 до 257), заканчивая местами резкого увеличения потока (номера 161, 180, 187 и 206).

Блоки химической реакции и точки, из которых выходят выбросы должны быть соединены прямоугольными газоходами, иначе система работать не будет. Спуски и подкорпусные газоходы круглого сечения снабжены



электроизоляционными вставками, обозначенными на схеме соответствующими цифрами.

Основной задачей является распределение потока из множества компонентов в сети. Основная задача формулируется из более маленьких задач, что позволяет более легко рассмотреть данный вопрос, таких как определение средней температуры в сети, разрежения или распределения несущего потока и объем подсасываемого воздуха в сеть.

Задачу разрежения потока в сети можно представить в виде нескольких связанных уравнений:

$$\begin{aligned}\sum_{l \in u_i} \nabla_{il} u_l &= q_i, i \in N; \\ \sum_{l \in N} \nabla_{il} p_i &= h_i(u_l), l \in N,\end{aligned}\tag{3.18}$$

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.

Первое уравнение являет собой закон сохранения потока в узле сети, второе же необходимо для описания взаимосвязи двух процессов – это падения давления и расхода в данной ветви, в гидравлических сетях для таких расчетов, чтобы увидеть прямую взаимосвязь между двумя показателями, применяют уравнение Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P_l = \frac{\lambda_l L_l}{D_l} + \xi_l \frac{\rho_l w_l^2}{2},\tag{3.19}$$

где  $\Delta P_l$  – падение давления на ветви;  $\lambda_l, \xi_l$  – коэффициенты линейного и местного трения, зависящие от скорости потока и определяемые по эмпирическим формулам;  $L_l, D_l$  – длина и гидравлический диаметр ветви;  $\rho_l$  – плотность газа в потоке;  $w_l$  – скорость потока.

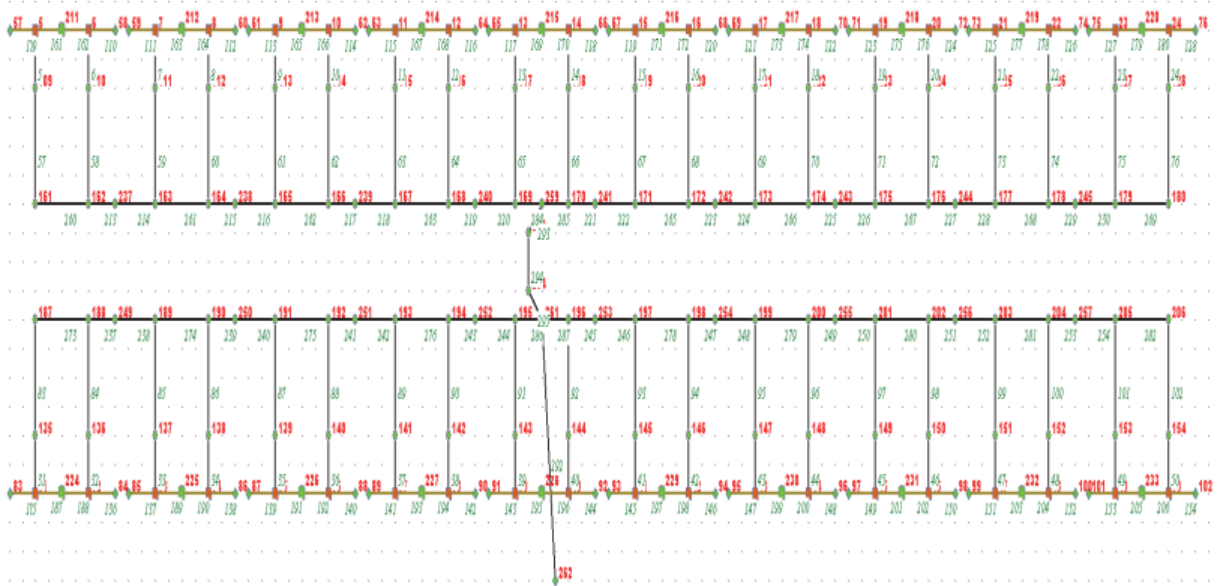


Рисунок 20 – Схема сети газоходов бригады корпуса электролиза, состоящая из: от 211 до 220 и от 224 до 233 – источники выбросов или электролизеры; от 5 до 24 и от 31 до 50 – горелочные устройства или узлы химического реагирования; от 162 до 179 и от 188 до 205 – тройники, от 237 до 245 и от 249 до 257 – диффузоры, 161, 180, 187 и 206 – места сети газоходов с режим увеличением потока

Чтобы вычислить концентрацию компонента и температуру на участках сети используется модель переноса по потоку:

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

$$x_l = u_l \eta_i, l \in O_i(u) \neq 0, i \in N, \quad (3.20)$$

где  $q_i^c$  – источник соответствующей характеристики в узле;  $u_l$  – несущий поток;  $\eta_i$  – функция состояния узла.

Первое уравнение нужно для того, чтобы показать закон сохранения характеристики потока в узле химического реагирования, второе же необходимо для описания сноса характеристики потоком.

Вычисление Теплового потока, который связан сквозь стенку с теплопередачей, происходит по следующей формуле:

$$q_l^{heat} = kF(t_l - t_{wal}), \quad (3.21)$$

где  $q_l^{heat}$  – искомый тепловой поток;  $k$ ,  $F$  – коэффициент теплопередачи и площадь поверхности стенки ветви;  $t_l$  – температура потока в ветви;  $t_{wal}$  – температура окружающей среды.

Для нахождения показателя средней температуры газа в ответвлении сети используют формулу, в которой она находится через площадь его внешней поверхности, температуры внешней среды и скорости потока:

$$t_l = t_{wal} + \frac{|u_l c_p|}{kF} (t_{Out(u_l)} - t_{wal}) \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{kF}{|u_l c_p|} \right] \right\}, \quad (3.22)$$

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

Вычисляем среднеарифметический показатель давления между узлами ветки для нахождения давления в трубе. Находим массовый поток, который забирается из начального по потоку узла ветки, при этом, если этот поток выходит из внешней среды, то этот поток сносит показатели внешней среды.

Чтобы оценить предложенные технические решения было произведено моделирование схемы нескольких сетей с пониженным аэродинамическим сопротивлением, чтобы этого достичь используются спуски от горелок в продольный подкорпусный газоход, который расположен под углом ввода в 30° и, также, используется регуляция разрежения и другие процессы. Модель основана на рабочих параметрах существующей сети газоходов, полученных в результате комплексных измерений на производстве.

При рассмотрении средних параметров работы сети наблюдается увеличение температуры и понижение разрежения в горелочных устройствах, чем дальше они находятся от источника, поперечного газохода, тем ниже их показатели: ближайшие эксплуатируются с избытком воздуха  $\alpha$  находящимся в промежутке между 5,1 и 5,7, а самые дальние с  $\alpha$  между 2,6 и 3,2, температура при этом в этих горелках ниже 1270 °С, температуры сгорания бензпирена.

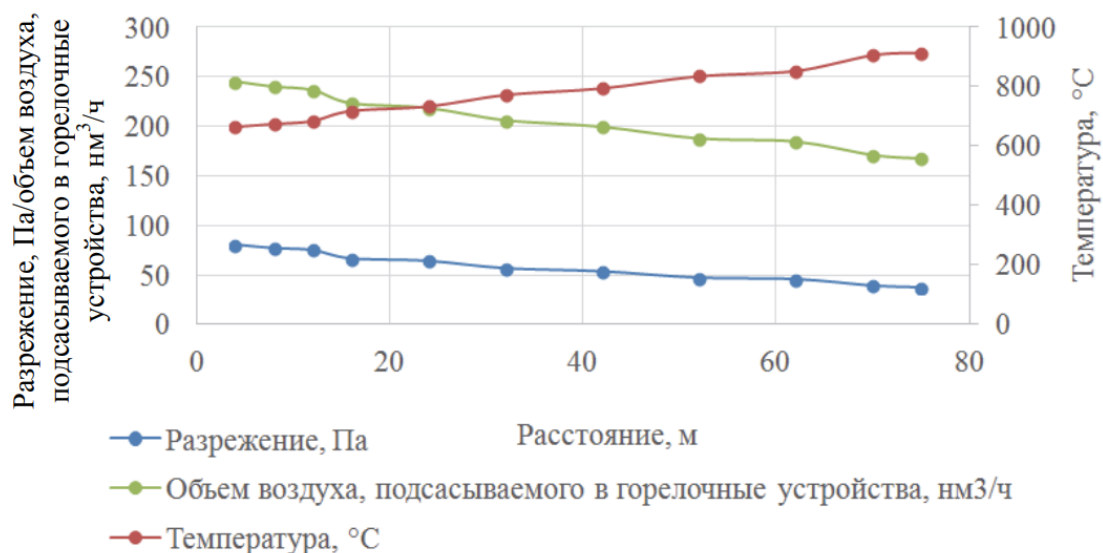


Рисунок 21 – Средние параметры работы существующей газоходной сети

Были получены результаты работы газоходных сетей с перечисленными улучшениями, их работа была отражена на рисунках 22, 23 и 24. По данным можно заметить, что при понижении аэродинамического сопротивления, воздух в самых близких к источнику разрежения горелочных устройствах подсасывается с избытком  $\alpha$ , который находится в пределах от 5,6 до 7,0, а в самых дальних от 4,8 до 4.9. Из-за этого дожигание анодных газов происходит намного хуже, что повышает выход газов в окружающую среду, потому что температура в точке горения колеблется между 520 и 720 °C.

При проектировании газоходной сети с регулированием в ней разрежения было выведено, что этого недостаточно, чтобы решить проблему повышения эффективности горения анодных, так как при использовании этого температура в зоне горения падает еще сильнее, что показано на рисунке 25.

Уменьшение избытка воздуха  $\alpha$  до значения между 1,2 и 1,5 может способствовать увеличению температуры в зоне горения. В таком случае, объем воздуха, подаваемого в горелочное устройство, будет составлять от 80 до 90 м³/ч, а средняя температура в зоне горения повысится до 1260 °C и выше. Это позволит эффективно сжигать смолистые вещества, в том числе бензпирен, которые содержатся в анодных газах.

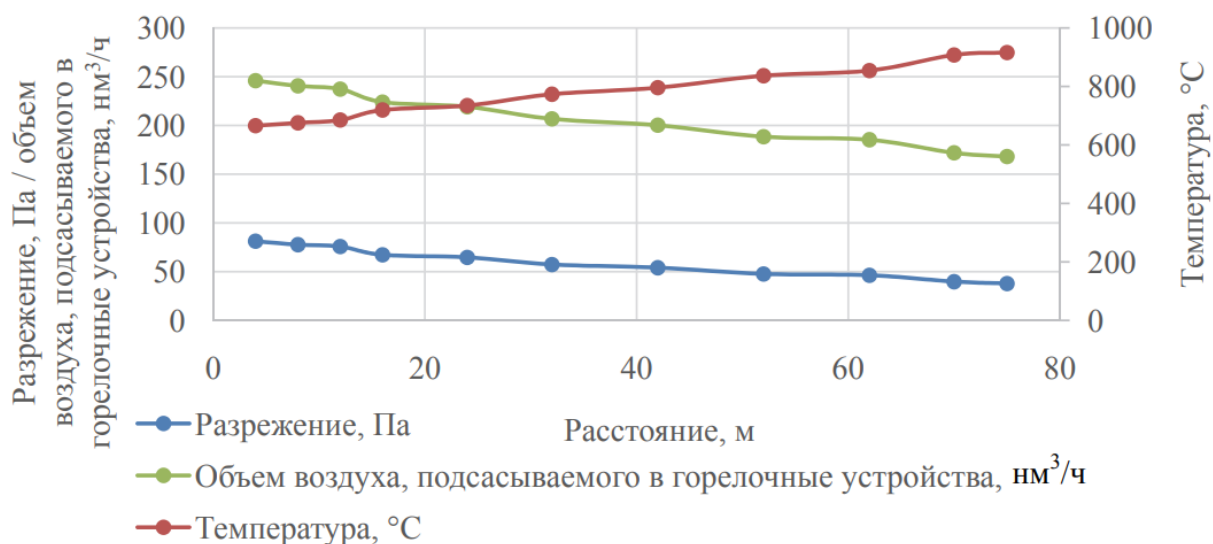


Рисунок 22 – Средние параметры работы газоходной сети с применением спусков от горелок в продольный подкорпусный газоход

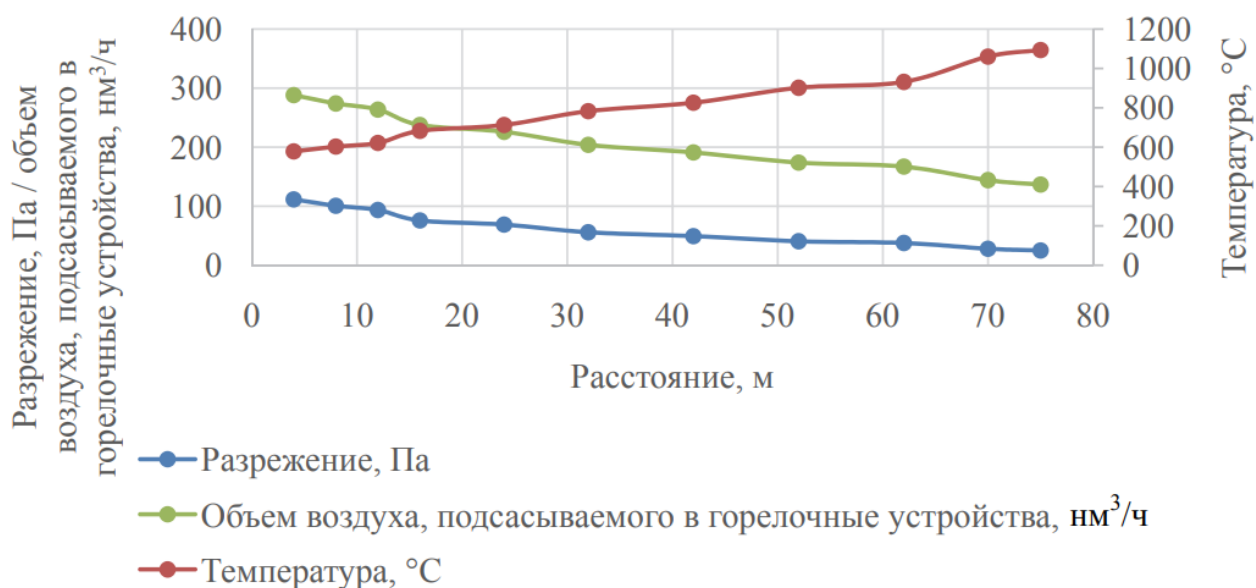


Рисунок 23 – Средние параметры работы газоходной сети при удалении пылесадительных камер горелок

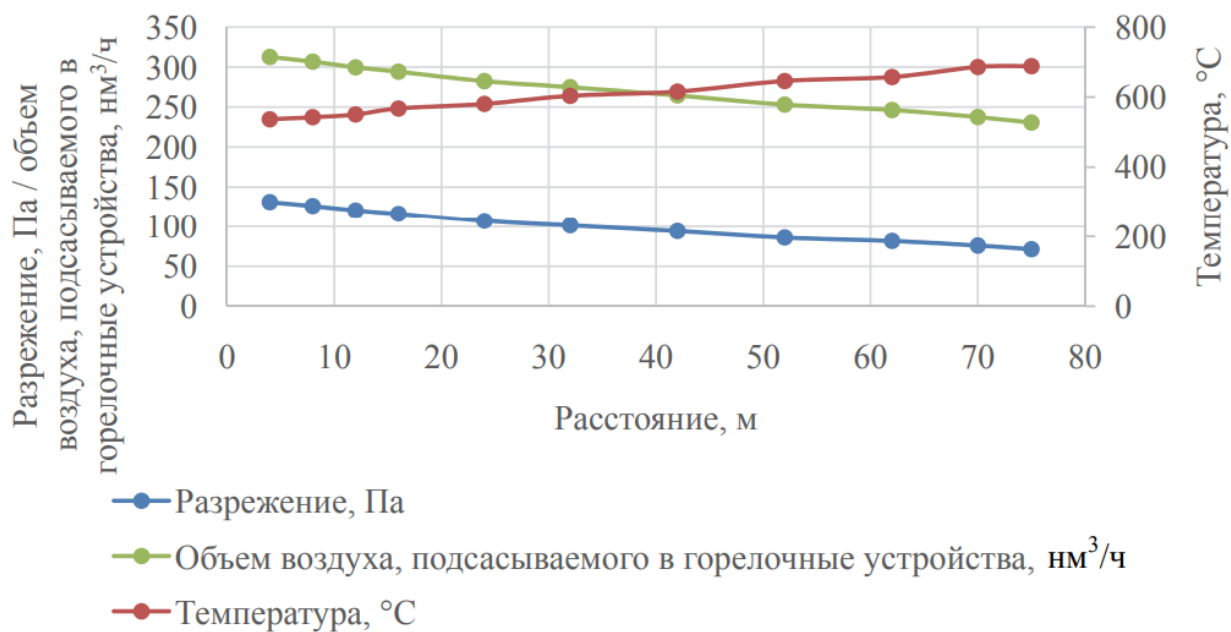


Рисунок 24 – Средние параметры работы газоходной сети со всеми улучшениями и с исключением подсоса воздуха в газоходном тракте по длине

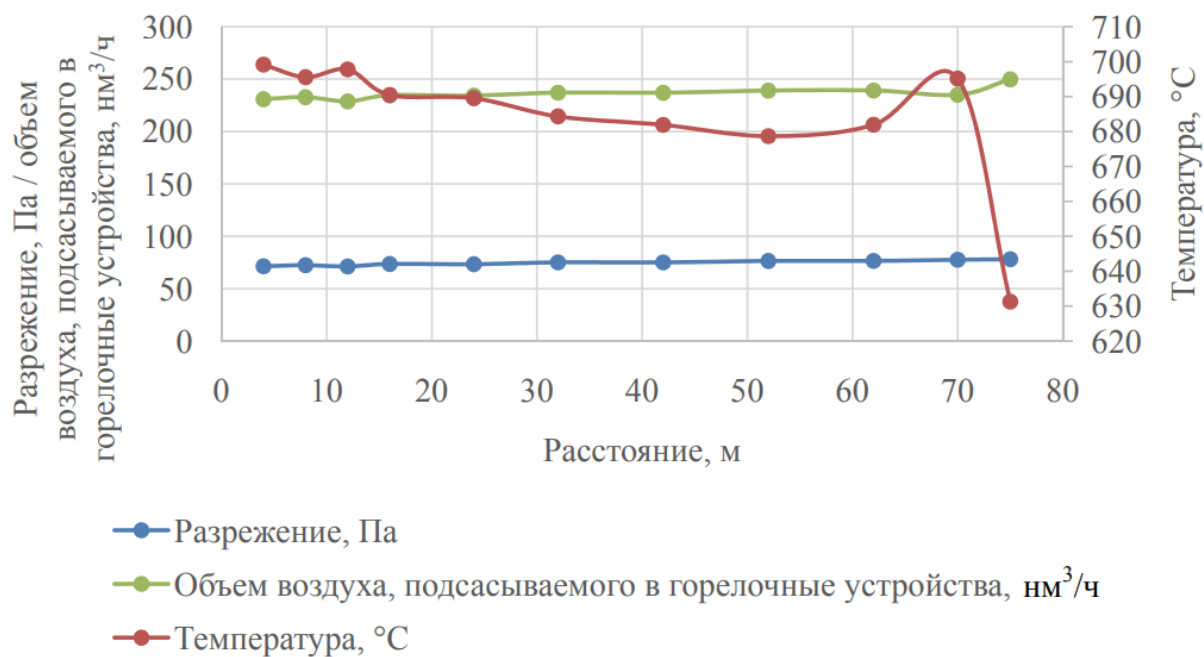


Рисунок 25 – Средние параметры работы газоходной сети с модернизациями (с уменьшенным аэродинамическим сопротивлением и регулированием разрежения в горелках)

Рассматривая формулу (2.1), можно прийти к выводу, понижение силы осаждения пыли на стенках труб и газохода возможно достигнуть при увеличении скорости газового потока до 15 м/с. Для достижения такой скорости необходимо понизить диаметр спусков от горелок в полтора раза, от 159 до 108

мм, а также снизить диаметры подкорпусных газоходов. На рисунке 26 была показана модернизированная «скоростная» сеть газоходов, в которой поддерживается необходимая скорость потока, но с использованием этого решения сильно падает разрежение, из-за чего работа горелочных устройств ухудшается, чтобы этого избежать нужно также осуществить регулирование разрежения, результат чего проиллюстрирован на рисунке 27.

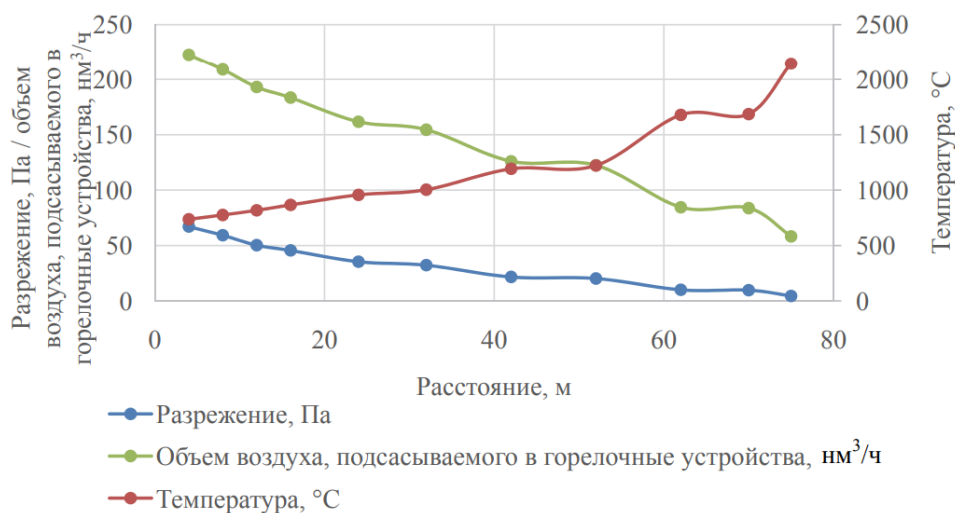


Рисунок 26 – Средние параметры работы «скоростной» газовой сети

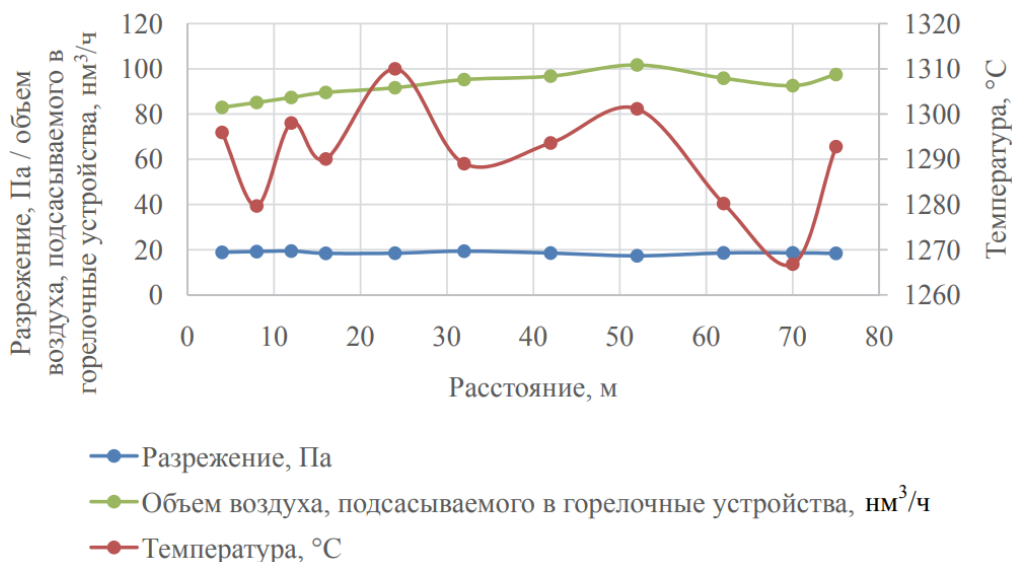


Рисунок 27 – Средние параметры работы «скоростной» газовой сети с регулированием разрежения в горелках

По средним результатам сети, показанных на рисунке 27, можно увидеть, что при применении всех решений в газоходной сети разность разрежений находится в пределах от 8 до 10% и не растет выше, а общий объем воздуха, который заходит в горелочные устройства, понижается в 2 раза, с 7500 до 3600  $\text{м}^3/\text{ч}$ . При уменьшении объема газовых выбросов, затраты на энергию для транспортировки газов и анодных газов уменьшаются на 25%. Кроме того, материалоемкость газоходной системы может быть сокращена более чем на 600 тонн путем уменьшения диаметров газоходов и удаления пылесадительных камер из системы на предприятии КрАЗ.

### **3.5 Выводы по главе 3**

В этой главе был проведен расчетный анализ различных компонентов системы газоудаления, были подобраны оптимальные конструктивные решения и технологии для реализации представленного анализа и повышения общей эффективности всей системы:

1. Получены результаты анализа стенок ГСК, в результате которого было получено то, что теплоизоляция существенно понижает теплопотери через нагревающиеся стенки.

2. После рассмотрения и расчета теоретической конструкции газоходной сети, были выведены варианты решений для повышения эффективности, а именно использование дисковых затворов для регуляции разрежения и использования тройников с оптимальным углом ввода до  $30^\circ$ .

3. Проведен расчет и сравнение количества теплоты, которая выделяется в систему газоудаления при процессе окисления анода, были предложены варианты ее использования: в бункере-теплообменнике для нагрева глинозема и в предварительном нагреве обожженных анодов.

4. Были рассмотрены и рассчитаны теоретические конструкции газоходной сети с предложенными техническими решениями.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе решалась задача, направленная на оптимизацию конструкции газоудалительной системы электролизера. В ходе выполнения получены следующие результаты.

1. Проведен анализ процесса электролиза алюминия, известных конструкций для этого процесса и сопутствующих выбросов от производства.

2. Изучена работа системы газоудаления, конструкция элементов системы, были отмечены недостатки системы, которые можно изменить или модифицировать для общего повышения эффективности.

2. Была проанализирована проблема потери тепла в окружающую среду через стенки ГСК, произведен сравнительный расчет отдельных секций с установленной изоляцией и без неё, который показал, что при установке теплоизоляции на стенки ГСК происходит значительное снижение теплотерь.

3. Проведен расчет и сравнение количества теплоты, выделяемой в систему газоудаления при процессе окисления анода, выявлено, что при повышении силы тока количество теплоты только растёт и предложены варианты эффективного использования данного тепла в предварительном нагреве глинозема через теплообменник, что понижает электроэнергетические затраты на производство и понизит время растворения глинозема, а также через использование этого тепла для предварительного нагрева обожженных анодов, при их использовании в производстве.

4. Рассмотрена теоретическая конструкция газоходной сети, в которой было предложено использование тройников для слияния потока с уменьшением угла ввода до  $30^\circ$ , что дает существенное снижение затрат электроэнергии, а также дисковых затворов для регулирования разрежения в газоходной сети.

5. Был проведен анализ работы газоходной сети до модернизации и после, выявлены проблемы предложенных вариантов конструкторских и технических решений, что дало результат существенного снижения энергетических и материалоемких затрат.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев, А. И., Жемчужина, Е. А. Поверхностные явления в металлургических процессах : учебное пособие / А. И. Беляев, Е. А. Жемчужина – Москва : Металлургиздат, 1952. – 371 с.
2. Гордон, Г. М., Пейсахов, И. Л. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии : учебное пособие / Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов – Москва : Металлургия, 1977. – 456 с.
3. Зиганшин, М. Г., Колесник, А. А., Посохин, В. Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки : пособие по проектированию / М. Г. Зиганшин, А. А. Колесник, В. Н. Посохин – Москва : Экопресс-ЗМ, 1988. – 505 с
4. ИТС 11-2016 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям производство алюминия: Дата введения 2017-01-01 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136806> (дата обращения: 18.05.2023).
5. Красноярский алюминиевый завод. Экологическая реконструкция. Раздел 8 «Перечень мероприятий по охране окружающей среды» : Проектная документация / АО «РУСАЛ всеоссийский алюминиевомагниеый институт». – Санкт-Петербург, 2022 г; – 445 с.
6. Криворученко, В. В., Коробов М. А. Тепловые и энергетические балансы электролизеров : учебник / В. В. Криворученко, М. А. Коробов – Москва : Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1963. – 320 с.
7. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия. Решение задач управления технологией: монография / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 272 с.

8. Повышение экологической и энергетической эффективности производства алюминия : монография / А. П. Скуратов, С. Г. Шахрай, И. В. Фомичев, А. В. Белянин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. – 180 с.
9. Технологическое решение интенсификации процессов газоудаления и газоочистки алюминиевого производства / В. Н. Николаев, В. В. Кондратьев // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. – 2012. – № 7. – С. 142-147.
10. Янко, Э. А. Производство алюминия : Пособие для мастеров и рабочих цехов электролиза алюминиевых заводов / Э. А. Янко – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского Университета, 2007. – 305 с. – ISBN 5-8216-0030-8.

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Теплотехники и гидрогазодинамики

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В. А. Кулагин

подпись инициалы, фамилия

« 29 » июня 2023 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код – наименование направления

Теплотехнический расчет системы газоудаления алюминиевого электролизера

тема

Научный Руководитель  
руководитель

[Подпись]  
подпись, дата  
16.06.23 г.

Профессор, д-р техн. наук  
должность, ученая степень

А.П. Скуратов  
инициалы, фамилия

Выпускник

[Подпись]  
подпись, дата  
16.06.23

А.С. Климкин  
инициалы, фамилия

Красноярск 2023