



Справочный неофициальный технический документ по методам сокращения выбросов при производстве алюминия

Справочный неофициальный технический документ

ЦГ ТЭВ

Декабрь 2020

Подготовлено KIT DFIU - TFTEI

Научно-технический секретариат ЦГ ТЭВ

Симон Глэзер-Шауд и Кармен Шиль

Справочный неофициальный технический документ по методам сокращения выбросов при производстве алюминия

Декабрь 2020

Дополнительная информация:

Научно-технический секретариат ЦГ ТЭВ

Д-р-Инж. Симон Глозер-Шауд

Технологический институт Карлсруэ (KIT)

Франко-немецкий институт экологических исследований

(DFIU/IIP) Hertzstraße 16

D-76187 Karlsruhe, Germany

Тел.: +49 (0)721 608 44592

e-mail: simon.gloeser-chahoud@kit.edu

https://www.iip.kit.edu/english/86_3966.php

Благодарности:

Аннализа БОРТОЛУЦЦИ (Eurométaux)

Бриджит ВИНТЕР (UBA, Австрия)

Кристиан ЛЕХМАНН (UBA, Германия)

Сандро СТАРИТА (Европейский алюминий)

Содержание

Содержание	3
Краткая информация	7
1 Введение	7
2 Производство алюминия	8
2.1 Производство первичного алюминия	9
2.2 Производство вторичного алюминия	14
3 Выбросы в атмосферу	16
3.1 Прямые выбросы	16
3.2 Косвенные выбросы	19
4 Методы снижения выбросов (НДТ)	20
4.1 Снижение выбросов при производстве глинозема	21
4.2 Снижение выбросов при производстве анодов	23
4.3 Сокращение выбросов при производстве первичного алюминия	26
5 Заключение	30
6 Список использованных источников	31

Список Рисунков

Рисунок 1: Основные производители алюминия в мире в 2016 году (US Geological Survey 2018a).....	8
Рисунок 2: Основная технологическая схема процесса Байера, который обычно применяется для получения глинозема в промышленных масштабах (Al_2O_3) из бокситов (The International Aluminium Institute, 2018b).....	10
Рисунок 3: Основная концепция процесса электролиза алюминия по методу Холла-Эру с плавленной солью, который является стандартным процессом восстановления глинозема (Al_2O_3) до элементарного металлического алюминия	11
Рисунок 4: Технологическая схема производства первичного алюминия (Kuenen et al. 2016).....	12
Рисунок 5: Технологическая схема производства вторичного алюминия (Kuenen et al. 2016).....	15
Рисунок 6: Принцип работы рукавного фильтра (Rijkswaterstaat Environment, 2017).....	22
Рисунок 7: Concept of a dry electrostatic precipitator (ESP) (Rijkswaterstaat Environment, 2017).....	22
Рисунок 8: Принцип работы системы сухой очистки	24
Рисунок 9: Концепция рекуперативного инсенератора (Rijkswaterstaat Environment 2017).....	24
Рисунок 10: Обзор основных выбросов в атмосферу при производстве алюминия (Cusano et al., 2017)	26

Список таблиц

Таблица 1: Входные потоки для производства 1 кг алюминия на основе средних значений для Германии 2020 года (Umweltbundesamt 2018)	9
Таблица 2: Категории алюминиевой промышленности и их распространение в Европе (Cusano et al. 2017).....	13
Таблица 3: Различные типы печей, используемых для производства вторичного алюминия (Cusano et al., 2017)	15
Таблица 4: Основные выбросы заводов по кальцинированию глинозема в среднем по заводу (Cusano et al., 2017)	17
Таблица 5: Прямые выбросы в атмосферу при производстве 1 кг первичного алюминия на основе средних значений для Германии	18
Таблица 6: Диапазоны основных выбросов в атмосферу при производстве анодов (Cusano et al., 2017)	19
Таблица 7: Косвенные выбросы отдельных загрязняющих веществ при производстве 1 кг алюминия на основе средних значений для Германии 2020 года (Umweltbundesamt 2018).....	20
Таблица 8: Сравнение производительности электрофильтра и рукавного фильтра при прокаливании глинозема во вращающейся печи для выбранных	

промышленных предприятий в Европе (Cusano et al., 2017)	22
Таблица 9: НДТ и соответствующие значения выбросов для производства анодов (завод по производству пасты), указанные в европейских заключениях НДТ (BAT Conclusions 2016).....	25
Таблица 10: НДТ и соответствующие значения выбросов для производства анодов (автономный пекарный завод), указанные в европейских заключениях НДТ (BAT Conclusions 2016).....	25
Таблица 11: Общие выбросы в атмосферу при производстве первичного алюминия (выплавка и электролиз) с использованием технологий снижения выбросов, которые в настоящее время находятся на самом высоком уровне, а именно: мокрая очистка для процесса Содерберга и BSS в сочетании с сухой очисткой глинозёмом для процесса с предварительно обожжёнными анодами (Cusano et al., 2017)	27
Таблица 12: Список НДТ для снижения выбросов в атмосферу, приведенный в европейских Заключениях НДТ (BAT Conclusions, 2016) для процессов с предварительно обожжёнными анодами (PFPB) и процесса Содерберга. Соответствующие значения выбросов приведены в Таблице 13	28
Таблица 13: НДТ и соответствующие значения выбросов при выплавке алюминия и электролизе, собираемые из электролизных камер и вентиляционных отверстий на крыше, как указано в Заключениях НДТ (BAT Conclusions 2016). Мокрые скрубберы используются только в случае очень высоких скоростей отходящих газов, из-за воздействия на другие среды и при наличии больших объёмов воды.....	29

Список основных сокращений/ аббревиатур

НДТ (BAT)	Наилучшая доступная техника (Best Available Technique)
СНДТ (BREF)	Справочный документ по наилучшим доступным техникам (Best Available Technologies Reference document)
BaP	Бензо(а)пирен (Benzo(a)pyrene)
ESP	Электростатический фильтр (Electrostatic Precipitator)
HF	Гидрофторид (Hydrofluoride)
LCA	Оценка жизненного цикла (Life-Cycle-Assessment)
NaOH	Гидроксид натрия (Sodium Hydroxide)
ПАУ (PAH)	Полициклические ароматические углеводороды (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)
PFC	Перфторированные органические соединения (Polyfluorocarbons)
ТЧ (PM)	Твердые частицы (Particulate Matter)
ЦГ ТЭВ (TFTEI)	Целевая группа по технико-экономическим вопросам (Task Force on Techno-Economic Issues)
ЕЭК ООН (UNECE)	Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций (United Nations Economic Commission for Europe)

Краткая информация

Этот неофициальный справочный документ был подготовлен Техническим секретариатом ЦГ ТЭВ и представляет собой краткий обзор современных методов сокращения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при производстве алюминия. После краткого общего описания процессов производства алюминия в отчете приводится систематический обзор соответствующих загрязнителей воздуха и соответствующих методов борьбы с ними, в основном основанный на Европейском СНДТ по цветной металлургии. Этот документ был признан актуальным и соответствующим текущим предельным значениям выбросов в ЕС. Там, где это возможно, помимо технических описаний, в документе включают экономические аспекты сокращения выбросов, касающиеся капитальных и эксплуатационных затрат.

Ввиду многогранности процессов вторичной переработки алюминия (рециклинга), в настоящем документе основное внимание уделяется первичному производству, а процессы рециклинга описаны в общих чертах. Однако включение вторичной переработки с акцентом на загрязняющие вещества воздуха может стать частью будущих мероприятий ЦГ ТЭВ.

1 Введение

Данное техническое обобщение дает быстрое, но всеобъемлющее представление об основных проблемах загрязнения воздуха при производстве алюминия и о том, какие меры были или могут быть применены для сокращения выбросов. Он основан на самой последней информации, полученной из различных научных и промышленных источников, а также государственных учреждений, таких как агентства по охране окружающей среды.

Эксперты ЦГ ТЭВ, в том числе соответствующие отраслевые ассоциации (European Aluminium и Eurometaux), были проинформированы об этой работе во время встреч ЦГ ТЭВ в 2018 году в Санкт-Петербурге и Брюсселе. Что касается наиболее значимых справочных документов, эксперты отрасли и другие эксперты, в частности, из природоохранных агентств по всей Европе, подтвердили, что СНДТ по цветной металлургии (Cusano et al., 2017) представляет собой обширный и актуальный свод знаний, который и служит основной базой для отчета. Проект отчета по алюминию был распространен среди вышеупомянутых экспертов через специальную рабочую группу для получения комментариев и согласования окончательного отчета в течение 2019 и в начале 2020 года.

Несмотря на то, что выбросы алюминиевой промышленности сравнительно хорошо контролируются в западной части региона ЕЭК ООН, в центральной и восточной частях региона это не всегда так. В данном документе представлена краткая информация о современных технологиях сокращения выбросов, текущих уровнях выбросов и экономических аспектах сокращения выбросов, насколько это возможно.

2 Производство алюминия

Основным производителем алюминия в мировом масштабе является Китай, за ним следуют Россия, Канада и Индия, как показано на Рисунке 1. Список стран свидетельствует о концентрации производства алюминия в странах со сравнительно дешевыми энергоресурсами, такими как нефть в Объединенных Арабских Эмиратах и Бахрейне или возобновляемые источники энергии (гидроэнергия) в Норвегии и Исландии. В целом производство алюминия можно разделить на первичное, основанное на добыче бокситов, и вторичное производство из отработанных материалов или потоков продукции (отходов и лома). Оба способа переработки кратко включают ниже для того, чтобы дать представление для дальнейшей оценки методов контроля выбросов. В то время как производство первичного алюминия достигло более 50 миллионов тонн в год, в первую очередь благодаря росту производства в Китае, его производство в ЕС неуклонно снижалось в течение предыдущего десятилетия и в настоящее время находится на уровне около 2 миллионов тонн в год. Большая часть производства алюминия в ЕС приходится на вторичное сырье, его текущий уровень составляет около 4 миллионов тонн в год. Основным фактором затрат при производстве первичного алюминия является электроэнергия. Как следствие, производство сосредоточено в регионах, где есть недорогая электроэнергия, например, в Норвегии с ее высокой долей гидроэнергии в общем объеме электроснабжения. Кроме того, увеличилось производство вторичного алюминия из лома.

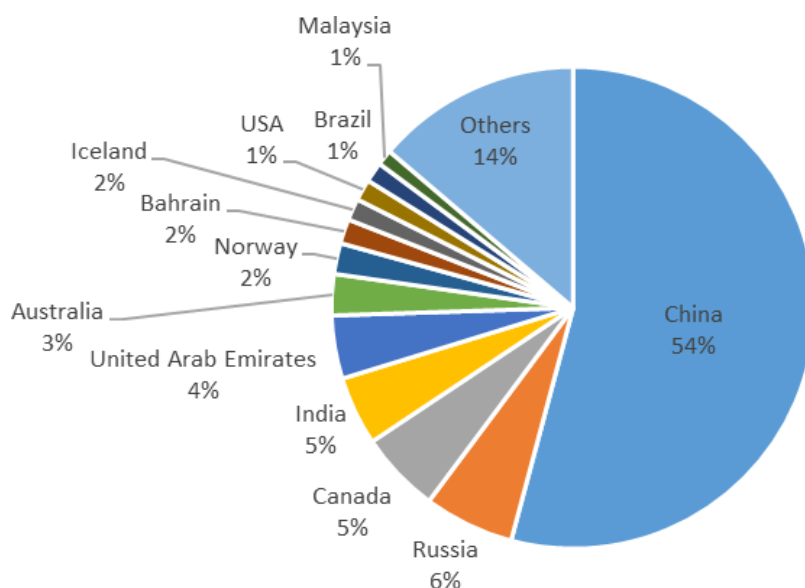


Рисунок 1: Основные производители алюминия в мире в 2016 году (US Geological Survey 2018a)

Европейская алюминиевая промышленность прилагает значительные усилия для снижения потребления электроэнергии, и в настоящее время средний показатель составляет 15 кВт/ч на кг. Производство и рафинирование вторичного алюминия гораздо менее энергозатратно: на один килограмм расходуется около 5 % энергии, необходимой для производства первичного алюминия (Cusano et al., 2017).

В Таблице 1 представлен текущий обзор входных потоков для производства алюминия из первичных источников (бокситов), которые будут дополнительно рассмотрены в отношении производственных процессов и результирующих выбросов в атмосферу в Разделе 3.

Таблица 1: Входные потоки для производства 1 кг алюминия на основе средних значений для Германии 2020 года (Umweltbundesamt 2018)

Выход:		
Алюминий	1	кг
Вход:		
Фторид алюминия	0.018	кг
Аноды-С	0.43	кг
Глинозем (Al ₂ O ₃)	1.9	кг
Бокситы	4-7	кг
Электричество	48.2	MJ
Технологическое тепло	3.83	MJ

2.1 Производство первичного алюминия

Первичное производство - это производство алюминия из природных ресурсов. Оно начинается с добычи бокситов, которая не рассматривается в данном отчете, поскольку не является традиционным промышленным процессом. Запасы бокситов в мире сравнительно велики. Страны с крупнейшими запасами - Гвинея, Австралия и Вьетнам (US Geological Survey 2018b). В 2016 году наибольшие объемы производства (добычи) приходились на Австралию и Китай (US Geological Survey 2018b). После добычи первым этапом, который необходимо исследовать, является производство глинозема из бокситов с помощью процесса Байера. Далее будет кратко представлен этот процесс, а также восстановление до алюминия, производство анодов и дальнейшие этапы первичного производства.

2.1.1 Производство глинозема (процесс Байера)

Производство алюминия начинается с получения глинозема из бокситов по так называемому процессу Байера. В процессе Байера каустическая сода (NaOH) используется для извлечения глинозема из бокситов в варочных котлах. Для этого процесса требуются высокие температуры и давление (Kuenen et al. 2016). Международный институт алюминия (2018b) упоминает температуру от 140°C до 280°C и давление около 3,5 МПа (в зависимости от температуры). Полученная суспензия содержит растворенный алюминат натрия и смесь оксидов металлов, которые представляют собой бокситовые остатки (красный шлам). Алюминатный раствор охлаждают и засевают глиноземом для кристаллизации гидратированного глинозема. Затем эти кристаллы прокаливают во вращающихся печах или в установках с кипящим слоем/вспышкой, после чего они готовы к использованию для дальнейшего производства алюминия (Kuenen et al. 2016). Более

подробное описание процесса Байера также представлено Международным институтом алюминия (2018b). На Рисунке 2 представлен обзор процесса Байера, как он был описан.

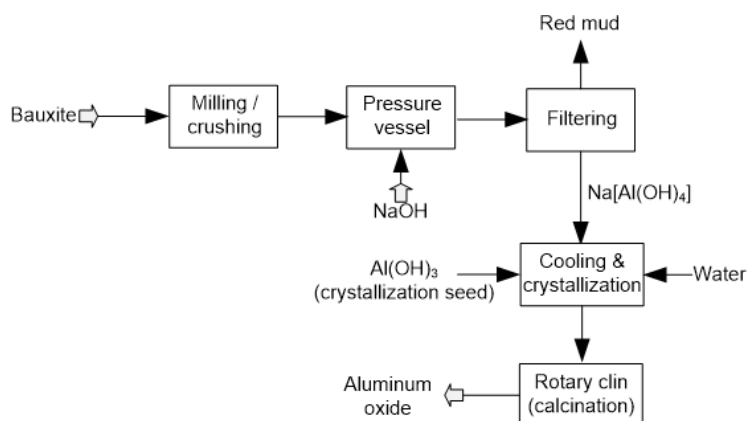


Рисунок 2: Основная технологическая схема процесса Байера, который обычно применяется для получения глинозема в промышленных масштабах (Al_2O_3) из бокситов (The International Aluminium Institute, 2018b)

По данным Международного института алюминия (2018b), для производства одной тонны глинозема требуется от двух до трех тонн бокситов. Мировое предложение глинозема составляет около 90 миллионов тонн, из которых 90% используется для производства алюминия. Глиноземные заводы часто располагаются вблизи бокситовых рудников и/или портов, чтобы сократить транспортные расходы на перевозку сырья и конечного продукта (The International Aluminium Institute 2018b). При обжиге бокситов образуются пыль, выбросы SO_2 , CO_2 и NO_x . Для борьбы с ними используется рукавный фильтр или электрофильтр (см. Раздел 3.1).

2.1.2 Восстановление алюминия

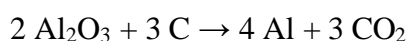
Алюминий производится из глинозема (оксида алюминия - Al_2O_3) с помощью процесса электрохимической плавки Холла-Эру (The International Aluminium Institute 2018b). Нижеследующее описание в основном основано на информации Международного института алюминия (2018a), однако может быть дополнено другими ссылками, поскольку процесс Холла-Эру является стандартным промышленным процессом, который практически не варьируется в различных областях применения.

Процесс Холла-Эру был разработан в 1886 году независимо друг от друга Чарльзом Мартином Холлом и Полем Эру. Это единственный промышленный метод плавки первичного алюминия. Через расплавленную смесь криолита, глинозема и фторида алюминия пропускается сильный электрический ток (постоянный ток силой до 600 кА), в результате чего получается чистый жидкий металлический алюминий. Ток подается в линию электролитических ячеек, соединенных последовательно ("серии электролиза"). Ячейки и серии электролиза различаются по размеру и конфигурации на разных заводах, однако основной электрохимический процесс идентичен. Каждая серия электролиза представляет собой большой металлический контейнер с углеродной прокладкой, который используется в качестве отрицательного электрода (катода) в электролизёре. Обычно катод служит от 1000 до 2500 дней, прежде чем его необходимо заменить (The International Aluminium Institute 2018a).

Высокое потребление электроэнергии является основной причиной того, что заводы по

производству первичного алюминия часто располагаются в других местах, нежели глиноземное производство. В то время как глинозем производится вблизи мест добычи бокситов, алюминий часто производится в местах с надежным и дешевым электроснабжением (Cusano et al. 2017).

В электролизёрх электролитическая ванна с расплавленным криолитом (Na_3AlF_6) поддерживается при температуре около $960 - 980^\circ\text{C}$, и в ней растворяется порошок глинозема. Для обеспечения оптимального химического состава и снижения температуры замерзания электролита в раствор добавляется фторид алюминия (AlF_3). В качестве положительных электродов (анодов) используются крупные углеродные блоки. Электрический ток, необходимый для расщепления атомов глинозема из-за высокой химической реактивности алюминия, проходит от углеродных анодов через ванну к углеродному катоду электролизёра, а затем к аноду следующей по очереди серии электролиза. Растворенный глинозем расщепляется на расплавленный алюминий (Al) и кислород (O_2). Далее кислород вступает в реакцию с углеродом в анодных блоках и образует углекислый газ в соответствии со следующей реакцией:



После разъединения, расплавленный алюминий опускается на дно электролизёра, а газообразные побочные продукты испаряются в верхней части. Затем алюминий выкачивается из емкости в процессе, называемом отводом, и транспортируется на специальные операции по легированию и/или литью (The International Aluminium Institute 2018a). На Рисунке 3 представлена схема электролиза алюминия с использованием плавленной соли.

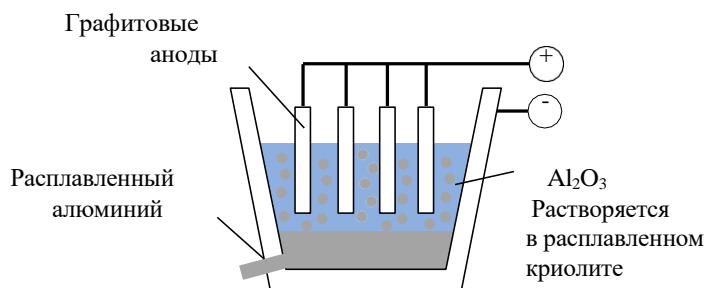


Рисунок 3: Основная концепция процесса электролиза алюминия по методу Холла-Эру с плавленной солью, который является стандартным процессом восстановления глинозема (Al_2O_3) до элементарного металлического алюминия

Основными загрязняющими веществами при производстве алюминия методом электролиза плавленной соли являются диоксид и моноксид углерода (связанные с потреблением анода), полифторуглероды (ПФУ) в связи с анодным эффектом; фториды, как газообразные, так и твердые частицы; твердые частицы; смола и ПАУ в случае электродов Содерберга; SO_2 ; NO_x и соединения металлов. Для улавливания этих загрязняющих веществ и рециркуляции фторидов в процессе плавки используются установки очистки отходящих газов. Установки очистки дымовых газов также могут использоваться для устранения других газообразных побочных продуктов, таких как диоксид серы, о чем подробнее будет рассказано в Разделе 4. Схема общего производства первичного алюминия представлена на Рисунке 4.

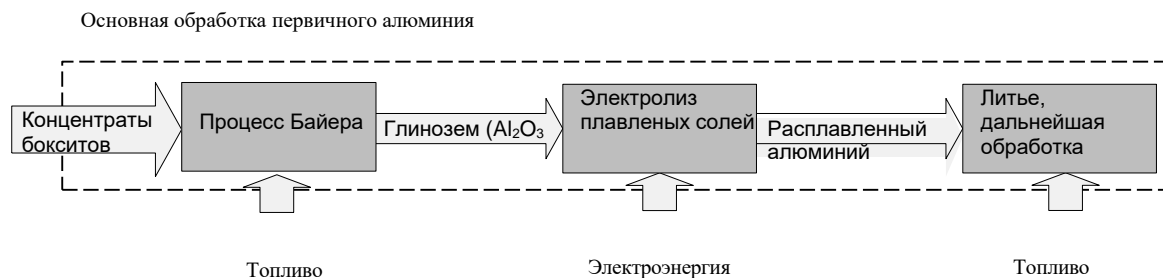


Рисунок 4: Технологическая схема производства первичного алюминия (Kuenen et al. 2016)

2.1.3 Производство анодов и технологии плавки

Угольные аноды для производства первичного алюминия часто, но не обязательно, производятся на той же площадке, что и сам алюминиевый завод (Cusano et al. 2017).

Можно выделить два основных типа технологий выплавки алюминия с различными типами анодов: технология Содерберга и технология предварительного обжига. Производство зеленой пасты является отправной точкой для изготовления всех углеродных анодов. Все зеленые пасты изготавливаются из смеси обожженного нефтяного кокса, очищенных и переработанных анодных штыбов, а также каменноугольного пека, который выполняет функцию связующего материала. Нефтяной кокс является остатком от перегонки сырой нефти и поэтому может быть загрязнен такими веществами, как металлы (например, никель) и соединения серы. Нефтяной кокс и анодные штыбы измельчаются, предварительно нагреваются, а затем смешиваются с пеком в подогреваемых смесителях.

В технологии Содерберга используется непрерывный анод, который вводится в электролизёр (или ванну) в виде пасты с добавлением пека и обжигается непосредственно внутри электролизёра. Тепло, выделяемое в процессе восстановления, используется для обжига пека до углеродной формы, необходимой для реакции с глиноземом, что позволяет утилизировать отходящее тепло внутри электролизёра.

Технология предварительного обжига, как следует из названия, предусматривает использование нескольких анодов в каждом электролизёре, которые обжигаются заранее в очень крупных газовых печах при высокой температуре, а затем опускаются в электролизёр. По окончании срока службы отработанные аноды заменяются новыми, а оставшиеся анодные штыбы перерабатываются (Международный институт алюминия, 2018а). Аноды предварительного обжига часто производятся в непосредственной близости от алюминиевого завода и изготавливаются из нефтяного кокса, пека и переработанных анодных штыбов, возвращённых из процесса электролиза. Эти материалы смешиваются в подогреваемых контейнерах и заливаются в формы. После формирования аноды направляются в обжиговый цех, где они помещаются в печь при температуре 1120°C на срок до двух недель. Этот процесс обеспечивает обжиг пека в составе смеси, формируя прочный углеродный блок, способный выдерживать экстремальные условия внутри электролизёров. Однородная структура анодных блоков обеспечивает эффективную проводимость тока и равномерное расходование анода в электролизере. После этого углеродные блоки соединяются со стальным стержнем (с помощью которого они опускаются в электролизёр и через который проходит электрический ток) при помощи расплавленного чугуна. Собранные аноды затем транспортируются в электролизный цех плавильного завода для установки в ванны восстановления (Primary World Aluminium, 2019). Эффективность технологии предварительного обжига по сравнению с процессом Содерберга, а также её более низкое

воздействие на окружающую среду (см. главу 2), объясняют преобладание плавильных заводов с предварительно обожжёнными анодами (см. Таблицу 2). Кроме того, современные предприятия, как правило, строятся с использованием этой технологии. Помимо типов анодов, можно выделить различные конфигурации подачи глинозема.

Таблица 2: Категории алюминиевой промышленности и их распространение в Европе (Cusano et al. 2017)

Технология электролизера	Тип электролизера	Конфигурация анодов	Конфигурация подачи глинозема	Аббревиатура	Распределение в Европе
Предварительный обжиг	Центральный	Вертикальный	Подача через разлом центрального канала	CWPB (*)	Нет
		Вертикальный	Точечная подача в центр	PFPB	90 %
	Боковой	Вертикальный	Ручная боковая подача	SWPB (*)	Нет
Технология Содерберга	Вертикальный	Вертикальный	Ручная боковая подача	SWVSS (*)	Нет
			Точечная подача	PFVSS	10 %
	Горизонтальный	Горизонтальный	Ручная боковая подача	HSS (*)	Нет
			Подача через разлом		
Точечная подача					
(*) : Больше не эксплуатируется в Европе.					

В настоящее время в Европе используется только технология точечной подачи сырья, и, по мнению экспертов отрасли ЦГ ТЭВ, это также характерно для большинства заводов по всему миру. В таблице 2 представлен обзор различных технологических конфигураций и их распространения в Европе (Cusano et al. 2017). Наиболее распространённая технология, известная как технология точечной подачи с предварительным обжигом (point feed prebake), использует несколько встроенных дозаторов и другие компьютеризированные системы управления для подачи глинозёма в электролизёр. Этот процесс повышает энергоэффективность, одновременно снижая выбросы, уровень пыли и расход сырья (The International Aluminium Institute 2018a). Компьютеризированные системы управления также позволяют снизить так называемый анодный эффект и, следовательно, избежать выбросов ПФУ.

Выбросы в атмосферу при производстве анодов включают углеводороды и ПАУ, диоксиды серы, пыль и фториды (только в случае использования анодных штыбков в производстве анодов). Образование SO₂ влияет используемое топливо и сырьё, зависит от используемого топлива и сырья, тогда как образование NO_x определяется температурой горения (см. Cusano et al, 2017, а также описания в следующем разделе данного отчета).

2.1.4 Дальнейшие шаги

После фактического производства алюминия обычно требуются дальнейшие производственные этапы для формирования конечных продуктов или полуфабрикатов. Примерами таких процессов являются литье, легирование, прокатка, экструдирование и т. д. Однако эти процессы оказывают сравнительно небольшое воздействие на прямые выбросы при производстве алюминия не связаны непосредственно с производством самого алюминия. Вместо этого они направлены на производство конечной продукции и поэтому не будут рассматриваться более подробно в данном отчете. Более подробную

информацию можно найти, например, в UC RUSAL (2018).

2.2 Производство вторичного алюминия

Производство вторичного алюминия - это процесс переработки алюминиевого лома в алюминий многократного использования. По данным The Aluminium Association (2018), этот процесс примерно на 92% более энергоэффективен, чем производство первичного алюминия. Kuenen et al. (2016) отмечают, что производство вторичного алюминия требует всего 5% от потребности в энергии для производства первичного алюминия. В Северной Америке около 40% от общего объема поставок алюминия приходится на производство вторичного алюминия (The Aluminium Association 2018). В Германии доля производства вторичного алюминия еще выше. В 2017 году 58% от общего объема производства алюминия приходилось на вторичный алюминий (WirtschaftsVereinigungMetalle 2018). Однако не стоит забывать, что отбракованный алюминий приходится несколько раз переплавлять, прежде чем он попадет в конечный продукт. Потребление энергии на этих этапах переплавки часто игнорируется при составлении энергетических балансов или анализе жизненного цикла (Harrison and Schéele 2009).

Процесс производства вторичного алюминия начинается с извлечения использованного алюминия из отходов. В этом контексте лом, разделенный по химическому составу или сплаву, имеет более высокую стоимость, чем лом, состоящий из смеси сплавов и других материалов. После сбора и сортировки лом расплавляется в печи при температуре от 700°C до 750°C (The Aluminium Association 2018). Тип печи зависит от качества лома и других технических параметров, поскольку существует несколько вариантов (см. Kuenen et al. 2016). Тип сырья и его предварительная обработка определяют наиболее подходящий тип печи, флюса и системы очистки, которые следует использовать для конкретного типа лома, в зависимости от его размера, содержания оксидов и степени загрязнения, а также других факторов (Cusano et al. 2017).

Ротационные или отражательные печи (также известные как печи с закрытым колодцем, камерные или подовые печи) используются для плавки широкого спектра вторичного сырья (в основном металллома). Ротационные печи могут быть оснащены механизмом наклона, который в некоторых случаях повышает эффективность плавления лома с низким содержанием алюминия, включая окалину и шлак, и позволяет сократить количество используемого флюса (Voin and Bertram, 2005). Индукционные и шахтные печи используются для плавки более чистых сортов алюминия. Отражательные печи, работающие на различных видах топлива, часто включают боковой колодец. Иногда для подачи расплавленного металла через боковой колодец и загрузочный колодец для расплавления мелких частиц используется насосная система (механическая или электромагнитная). В Таблице 3, составленной на основе данных Cusano et al. (2017), представлен общий обзор различных типов печей, используемых для производства вторичного алюминия.

Таблица 3: Различные типы печей, используемых для производства вторичного алюминия (Cusano et al., 2017)

Параметр	Ед. Изм.	Ротационная барабанная печь	Наклонная ротационная печь	Закрытая колодезная или пламенная печь		Шахтная печь	Тигельная печь	Канальная индукционная печь
				Одиночная камера	Мульти-камера с плавкой мост			
Предпочтительное применение		Вторичный алюминий	Вторичный алюминий	Вторичный алюминий / литейные цеха		Литейные цеха	Литейные цеха	Вторичный алюминий
Тип сырья		Лом алюминия	Лом алюминия	Слитки, алюминиевый лом		Слитки, новый лом	Слитки, новый лом	Слитки, Лом алюминия
Производительность	t	До 150	До 30	До 180		До 4	До 6	До 50
Эффективность плавления	t/ч	До 20	До 7	До 30		До 2,5	До 3	До 7
Предпочтительные виды топлива		Природный газ, сжиженный нефтяной газ (LPG), лёгкое/средне-тяжёлое топливо	Природный газ, LPG, экстралёгкое топливо	Природный газ, LPG, экстралёгкое топливо		Природный газ, LPG, экстралёгкое топливо	Природный газ, LPG, экстралёгкое топливо или электронагрев	Электронагрев
Диапазон энергопотребления	ГДж/т	2-5	2-2.5	2.1-4.3		2.1-3.3	0.9-7.4	около 3,6

После этого расплавленный алюминий может сохраняться в жидком состоянии или отливаться в крупные слитки. Для получения металла с заданными свойствами для конкретных применений в жидкий алюминий могут добавляться легирующие элементы (The Aluminium Association 2018). Процесс переработки алюминия, как правило, не ограничивается определенным количеством циклов. Поэтому не следует ожидать потери качества переработанного алюминия, если примеси в достаточной степени снижены в процессе производства вторичного алюминия (The Aluminium Association 2018). Следовательно, важно, чтобы содержание примесей было снижено до этапа плавки. В противном случае в конечном продукте останутся нежелательные металлы и примеси. В отличие от вторичного производства меди, где конечной стадией является процесс электролиза, а первичная и вторичная медь получают одинакового качества, в случае вторичного алюминия дело обстоит иначе. Иногда первичный алюминий используется для "разбавления" вторичного алюминия и снижения концентрации примесей. Операторы заводов сообщают о различной доле первичного алюминия в производстве вторичного для достижения требуемого качества в зависимости от состава и чистоты лома.

Схема процесса показана на Рисунке 5.

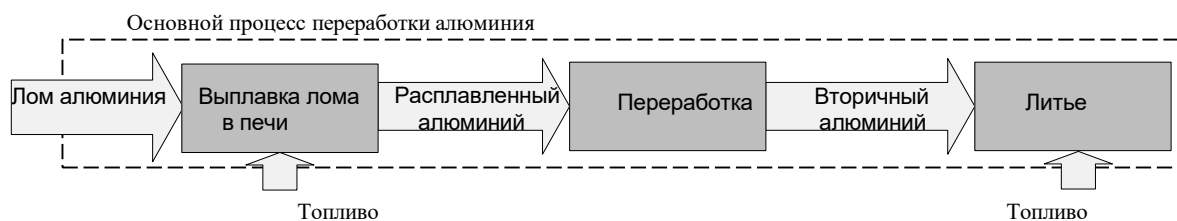


Рисунок 5: Технологическая схема производства вторичного алюминия (Kuenen et al. 2016)

3 Выбросы в атмосферу

Выбросы в атмосферу при переработке вторичного алюминия в значительной степени зависят от типа топлива, используемого для нагрева печи, а также от примесей, содержащихся в перерабатываемом ломе. Например, вторичные материалы из фракции легких металлов после обычных процессов измельчения потребительских товаров и машин, включая отслужившие свой срок автомобили, могут содержать определенное количество пластика и других примесей, что напрямую влияет на выбросы в атмосферу. Кроме того, вторичные материалы могут содержать примеси и поэтому в некоторых случаях разбавляются первичным материалом высокой чистоты. Это может привести к нескольким процессам плавки, так как вторичный материал обычно превращается в слитки или бруски, которые затем продаются и используются в процессах литья, требующих повторной плавки. При производстве вторичного алюминия возможны выбросы в атмосферу пыли, соединений металлов, Cl_2 , HCl , NO_x , SO_2 и HF , а также продуктов неполного горения, таких как ПХДД/ПХДФ (полициклические хлорированные дибензо-*p*-диоксины/дибензофураны) и другие органические соединения, образующиеся в плавильных и обработочных печах (Cusano et al., 2017). Поскольку общие выбросы в процессе переработки вторичных материалов могут значительно варьироваться, данный документ сосредоточен на производстве первичного алюминия, для которого выбросы в атмосферу можно определить более точно. В случае производства вторичного алюминия выбросы сильно зависят от качества лома, а также от примесей или загрязнений исходных материалов.

В то время как производство глинозема из бокситов (процесс Байера) в основном приводит к образованию большого количества твердых и жидких отходов (в частности, красного шлама, который обычно захоранивается). Однако процесс обжига анодов (например, при использовании технологии предварительного обжига, см. табл. 2) и последующий электролиз являются наиболее энергоемкими этапами и вызывают значительное загрязнение воздуха. Более подробно эти выбросы определяются в следующем разделе.

3.1 Прямые выбросы

В этом разделе мы приводим общий обзор выбросов в атмосферу на различных этапах производства первичного алюминия, а подробное обсуждение технологий снижения выбросов представлено в Разделе 3.

3.1.1 Обжиг бокситов

При обжиге бокситов образуются выбросы пыли, SO_2 , CO_2 и NO_x . Для их снижения используются рукавные фильтры или электрофильтры (Cusano et al, 2017).

При обжиге бокситов в процессе Байера образуются выбросы пыли, CO_2 и NO_x , также зависящие от используемого топлива. Поэтому выбросы NO_x на действующих предприятиях сильно варьируются, в основном в зависимости от типа горелок (см. Раздел 3.1). В Таблице 3 приведены данные о выбросах при производстве глинозема с использованием распространенных технологий снижения выбросов в окружающую среду (рукавные фильтры или электрофильтры, описание технологий см. в Разделе 3).

Таблица 4: Основные выбросы заводов по кальцинированию глинозема в среднем по заводу (Cusano et al., 2017)

Параметр выброса	Значение выбросов
Пыль (кг/кг глинозема)	$2-100 \cdot 10^{-6}$
NO _x (кг/кг глинозема)	$90-330 \cdot 10^{-6}$
CO ₂ (кг/кг глинозема)	не сообщается

3.1.2 Производство анодов

Выбросы в атмосферу при производстве анодов включают углеводороды и ПАУ, диоксид серы, пыль и фторидами (только при использовании анодных штыбов в производстве анодов). На образование SO₂ влияют используемое топливо и сырье, в то время как образование NO_x определяется температурой горения (Cusano 2017).

Если новый анодный завод связан с заводом по производству первичного алюминия, технологические газы с завода могут быть объединены с газами электролизной камеры для очистки с использованием глинозема. На существующих заводах газы обрабатываются отдельно в сухом скруббере с использованием глинозема. Собранный глинозем используется в электролитических электролизёрх. Пыль от погрузочно-разгрузочных работ и механических процессов, таких как измельчение, смешивание и формовка, собирается в рукавные фильтры. При наличии в газах паров пека можно использовать сухие скрубберы для кокса, каталитические окислители (СТО) или регенеративные термические окислители (RTO) (Cusano 2017).

3.1.3 Общие выбросы без учета выбросов процесса Bayer

Основные выбросы в атмосферу при производстве алюминия происходят в основном в процессе плавки и электролиза, а также при изготовлении анодов из углеродных материалов. Тем не менее, за последние десятилетия алюминиевая промышленность значительно снизила удельные выбросы в атмосферу: в то время как производство первичного алюминия за период 1990-2010 гг. выросло более чем в два раза, общее количество прямых парниковых газов от производственного процесса увеличилось всего на 20 % (Primary World Aluminium 2019).

В Таблице 4 приведены текущие данные по прямым выбросам в атмосферу при производстве алюминия в Германии. Сюда не входит вышеупомянутый процесс Байера по производству глинозема (Al₂O₃) из бокситов, а основное внимание уделяется последующей плавке и процессу электролиза плавленной соли для восстановления глинозема до элементарного металлического алюминия. Поскольку выбросы также зависят от технологии выплавки (технология Содерберга и технология предварительного обжига, см. Раздел 1.1.3), в документе СНДТ предоставляется дополнительные диапазоны выбросов для соответствующих технологий плавления. Подробная информация о сокращении выбросов при использовании различных технологий снижения выбросов приводится в следующем разделе. Цифры в Таблице 4 также относятся только к прямым технологическим выбросам и не включают высокий уровень дополнительных выбросов, в основном связанных с потреблением энергии, которые часто упоминаются в общей литературе по оценке жизненного цикла (LCA). Косвенные выбросы в результате производства алюминия перечислены в следующем разделе.

Таблица 5: Прямые выбросы в атмосферу при производстве 1 кг первичного алюминия на основе средних значений для Германии¹

Загрязняющее вещество	Прямые выбросы	Единица
CO	0.18	кг/кг Al
CO ₂	1.4	кг/кг Al
HF	40*10 ⁻⁶	кг/кг Al
Перфторэтан	25*10 ⁻⁶	кг/кг Al
Перфторметан	250*10 ⁻⁶	кг/кг Al
SO ₂	0.007	кг/кг Al
ТЧ ₁₀	706*10 ⁻⁶	кг/кг Al
PM _{2.5}	581*10 ⁻⁶	кг/кг Al

За последние десятилетия выбросы фтора в атмосферу считались наиболее важным загрязняющим веществом от алюминиевых заводов. Фториды могут накапливаться в растительности и наносить ущерб флоре и фауне. Например, они накапливаются в растениях и оттуда попадают в пищевую цепь жвачных животных, поедающих загрязненные фтором корма. Таким образом, в зависимости от местных условий фториды могут оказывать серьезное воздействие на окружающую среду, а также на здоровье человека.

В настоящее время благодаря эффективной системе сбора газов из электролизных ячеек в центрах обработки газов (GTC) основным источником выбросов фторидов являются неорганизованные выбросы из ячеек предварительного обжига с точечной подачей, которые производят около 90% мирового первичного алюминия. Остальная часть выбросов собирается непосредственно внутри ячейки и поступает в эффективные системы очистки, которые удаляют твердые частицы и газы.

Что касается перфторуглеродов (ПФУ), использование компьютерных технологий позволяет контролировать процесс до мельчайших деталей, минимизируя возникновение анодного эффекта. С начала 1990-х годов количество и продолжительность анодных эффектов значительно сократились благодаря эффективному контролю подачи глинозёма и состояния анодов. Однако ещё более значительное снижение выбросов ПФУ связано с ростом производства, основанного на современных технологиях с низким уровнем выбросов ПФУ. Эти меры позволили снизить выбросы ПФУ на тонну произведённого алюминия почти на 90%, а общие выбросы ПФУ сократились более чем на 70%. Алюминиевая промышленность поставила перед собой добровольную цель сократить выбросы ПФУ на тонну алюминия ещё на 50% в период с 2006 по 2020 годы (World Aluminium 2017).

На сегодняшний день прямые выбросы парниковых газов в отрасли обусловлены преимущественно потреблением углеродных анодов и сжиганием топлива в процессах рафинирования, производства анодов и литья, причем оба эти процесса зависят от объёма производства и имеют лишь ограниченные возможности для сокращения, помимо постепенного повышения эффективности. Перед отраслью стоит задача повысить энергоэффективность рафинирования глинозёма на 10 % в период с 2006 по 2020 год на глобальном уровне, и эта цель уже почти достигнута (Primary World Aluminium 2019).

¹ <https://iir-de.wikidot.com/2-c-3-aluminum-production>

Процесс электролиза, а также производство анодов из нефтяного кокса, каменноугольного пека или переработанных анодных штыбов могут приводить к значительным выбросам в атмосферу. Возможны выбросы в атмосферу простых углеводородов или полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), SO₂, пыли и фторидов (только если в производстве анодов используются анодные штыбы, являющиеся вторичным анодным материалом). На образование SO₂ влияют используемое топливо и сырье, в то время как образование NO_x определяется температурой горения. Выбросы могут выходить из технологического процесса либо в виде организованных выбросов (первичные выбросы), либо в виде диффузных выбросов (вторичные выбросы), относительная значимость соответствующих источников выбросов зависит от возраста предприятия и используемой технологии. Организованные выбросы, как правило, контролируются непрерывно или периодически и докладываются ответственными сотрудниками предприятия или внешними консультантами в компетентные органы. Предусматривается возможность обхода установок очистки газов в случае их отказа или во время проведения технического обслуживания (Cusano et al., 2017). В таблице 5 приведены диапазоны выбросов в атмосферу от существующих установок по обжигу анодов.

Таблица 6: Диапазоны основных выбросов в атмосферу при производстве анодов (Cusano et al., 2017)

Параметр выброса	Значение выбросов
Общий фтор (кг/кг анода)	10-100*10 ⁻⁶
Пыль (кг/кг анода)	10-1000*10 ⁻⁶
SO ₂ (кг/кг анода)	100 - 6000*10 ⁻⁶
NO _x (кг/кг анода)	100 - 400*10 ⁻⁶
VaP (кг/кг анода)	0-3*10 ⁻⁶

3.2 Косвенные выбросы

Косвенные выбросы, связанные с производством алюминия, в основном обусловлены большим объёмом потребляемой энергии в процессе электролиза и восстановления глинозёма до элементарного алюминия в расплавленных солях. Эти косвенные выбросы не являются предметом рассмотрения в данном документе, однако, поскольку в некоторых отчетах не проводится четкого различия между прямыми и косвенными выбросами, эти цифры приводятся здесь в качестве дополнительной информации, чтобы избежать недопонимания. Естественно, эти косвенные выбросы в большой степени зависят от энергетического баланса, доли электроэнергии, получаемой из возобновляемых источников (например, гидроэнергии, ветра или солнечной энергии), и ископаемого топлива, используемого для производства электроэнергии. Поэтому эти косвенные выбросы могут быть оценены только приблизительно для конкретных стран, регионов или производственных объектов. В Таблице 6 приведены данные о косвенных выбросах в результате производства первичного алюминия в Германии. Обратите внимание, что в списке указаны только те выбросы в атмосферу, которые имеют отношение к деятельности ЦГ ТЭВ. Полный список всех выбросов и отходов, образующихся при производстве алюминия, был опубликован Федеральным ведомством по охране окружающей среды Германии (Umweltbundesamt 2018).

Таблица 7: Косвенные выбросы отдельных загрязняющих веществ при производстве 1 кг алюминия на основе средних значений для Германии 2020 года (Umweltbundesamt 2018)

Загрязняющее вещество	Косвенные выбросы	Единица
CO	0.011	кг/кг Al
CO ₂	8.02	кг/кг Al
HF	14.2*10 ⁻⁶	кг/кг Al
Перфторэтан	0.1*10 ⁻⁶	кг/кг Al
Перфторметан	1*10 ⁻⁶	кг/кг Al
SO ₂	0.0184	кг/кг Al
Пыль	0.02234	кг/кг Al
Hg (к воздуху)	85.1*10 ⁻⁹	кг/кг Al
N ₂ O	558*10 ⁻⁶	кг/кг Al
NH ₃	612*10 ⁻⁶	кг/кг Al
NMVOС	0.0011	кг/кг Al
NO _x	0.0204	кг/кг Al

На глобальном уровне увеличение косвенных выбросов, связанных с поставками электроэнергии, логично связано с ростом мирового производства алюминия. Учитывая, что глобальный энергетический микс отрасли сместился в сторону использования ископаемых тепловых источников энергии, можно предположить, что косвенные выбросы на мировом уровне даже превышают указанные в Таблице 6, несмотря на то, что в некоторых странах-производителях алюминия преобладают возобновляемые источники энергии (например, гидроэнергетика в Норвегии). С 1990 по 2010 год промышленность сократила потребление электроэнергии, необходимой для процесса плавки и электролиза, на 10% и поставила перед собой цель еще больше повысить энергоэффективность на 5% к 2020 году (Primary World Aluminium 2019). Тем не менее производство алюминия будет оставаться высокоэнергоёмким, а косвенные выбросы будут зависеть в основном от доли возобновляемых источников энергии.

4 Методы снижения выбросов (НДТ)

Данный раздел в основном ссылается на "Справочный документ по наилучшим доступным техникам (НДТ) для предприятий цветной металлургии" (Cusano et al. 2017), предоставленный Европейским союзом. Кроме того, обобщена и представлена информация из Заключения НДТ (BAT Conclusions, 2016). Мы приводим полный обзор современного состояния технологий снижения выбросов в атмосферу при производстве алюминия и обсуждаем открытые задачи в этом контексте. В обзоре технологий основное внимание уделяется производству первичного алюминия с помощью технологических операций, описанных в Разделе 1. Как было описано ранее, производство вторичных материалов из процессов переработки является более неоднородным в отношении примесей, выбросов и концепции процесса. Поэтому в отношении методов вторичной переработки и снижения выбросов мы ссылаемся на существующие литературные источники, но не рассматриваем их детально.

4.1 Снижение выбросов при производстве глинозема

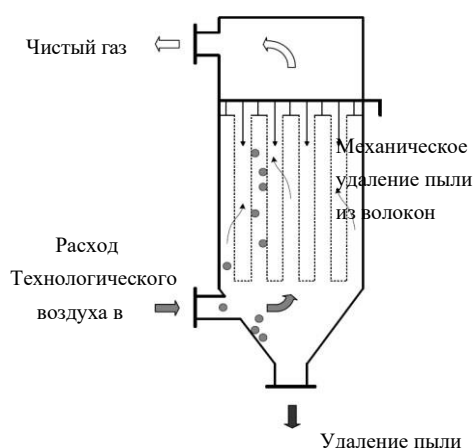
При производстве глинозема $[Al_2O_3]$ по технологии Байера, в частности при обжиге бокситов (см. Рисунок 2), образуются выбросы пыли, SO_2 , CO_2 и NO_x . Для удаления пыли (твердых частиц) в основном применяются рукавные фильтры или электростатические фильтры (ESP). Поскольку эти технологии широко распространены в обрабатывающей промышленности, они лишь вкратце описаны в данном разделе, а подробное описание представлено в работе Cusano et al. (2017). Рукавные фильтры для очистки технологических выбросов в атмосферу при производстве глинозема по технологии Байера используются в основном на стадии дробления и измельчения (см. Рисунок 2), где образуются более крупные частицы пыли. При использовании рукавного фильтра для очистки технологического воздуха на стадии измельчения и дробления загрязненный воздух проходит через рукавный фильтр и отделяет частицы пыли. Пыль периодически удаляется из фильтра и собирается в воронку (бункер), расположенную под фильтрующей установкой. Поступающий воздух обычно не направляется непосредственно в фильтры, а проходит через одну или несколько разделительных пластин, чтобы добиться хорошего распределения давления на ткань. Это также приводит к потере кинетической энергии технологического воздуха, что позволяет предварительно удалить его под действием силы тяжести. Для частого удаления накапливающейся пыли из фильтра используется механизм отвода (Rijkswaterstaat Environment, 2017). Пыль, которая падает с ткани, попадает в нижнюю часть фильтра и может быть повторно использована в процессе (см. Рисунок 6).

Обжиг в вращающейся печи, которая является заключительным этапом производства глинозема (см. Рисунок 2), вызывает большую часть выбросов в атмосферу при производстве глинозема из бокситов. Независимо от того, какая технология обжига используется, образуется тонкая глиноземная пыль, которая обычно собирается электростатическим фильтром (ESP) или рукавными фильтрами. Применимость рукавных фильтров также зависит от температуры отходящих газов, а технология ESP обычно обеспечивает достаточное удаление твердых частиц. Однако следует учитывать, что производительность электрофильтра пропорциональна содержанию пыли в отходящих газах (чем выше содержание, тем выше выбросы), в то время как рукавный фильтр позволяет поддерживать постоянные значения выбросов и обычно работает лучше, чем система электрофильтра (Cusano et al., 2017). В частности, во время остановки и запуска установки выбросы пыли при использовании электрофильтра значительно выше, чем при использовании рукавных фильтров. Кроме того, материалы рукавных фильтров были усовершенствованы в последние годы, что делает возможным их применение при более высоких температурах отходящих газов. В таблице 8 приведен обзор эффективности технологии электрофильтров по сравнению с рукавными фильтрами для некоторых отобранных заводов на основе документа СНДТ (Cusano et al. 2017). Как видно из Таблицы 8, существуют значительные различия в производительности систем электрофильтров.

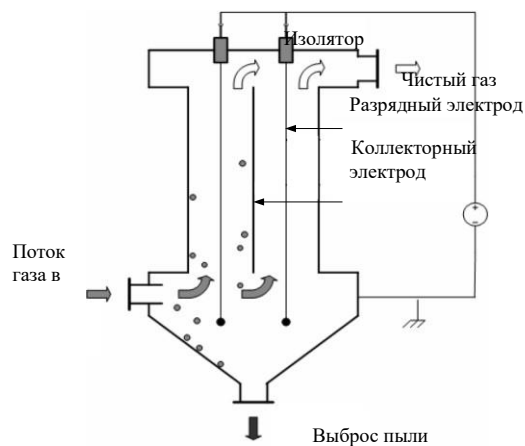
Таблица 8: Сравнение производительности электрофильтра и рукавного фильтра при прокаливании глинозема во вращающейся печи для выбранных промышленных предприятий в Европе (Cusano et al., 2017)

Средний расход дымового газа (Нм ³ /ч)	Технология снижения выбросов	Среднее значение выбросов пыли	
		мг/Нм ³	(кг/т глинозема)
220 000	ESP	68	0.1
300 000	ESP	23	0.01
107 000	Рукавный фильтр	23	0.07
93 000	Рукавный фильтр	23	0.05

Таким образом, вопрос об использовании технологии электрофильтра или рукавного фильтра должен решаться индивидуально для каждого случая с учетом экономических аспектов, описанных далее. Основная концепция электрофильтра показана на Рисунке 7, а на Рисунке 6 представлена классическая концепция рукавного фильтра.



Рисунки 6: Принцип работы рукавного фильтра (Rijkswaterstaat Environment, 2017)



Рисунки 7: Concept of a dry electrostatic precipitator (ESP) (Rijkswaterstaat Environment, 2017)

Выбросы SO₂ напрямую связаны с содержанием серы в топливе, используемом для нагрева вращающейся печи. NO_x также образуется в процессе горения и его уровень зависит от типа используемого топлива, конструкции горелки, камеры сгорания и температуры. Поэтому европейский документ СНДТ (Cusano et al., 2017) рекомендует выбирать топливо с низким содержанием серы или природный газ, где это возможно, и использовать горелки с низким содержанием NO_x. В документе не упоминается необходимость дополнительной обработки процессного воздуха на глинозёмных заводах (Cusano et al., 2017) не упоминается. В Заключениях НДТ, опубликованных Европейской комиссией в 2016 году, рекомендуемые методы соответствуют описанным выше, а дополнительные значения выбросов, касающиеся загрязнения воздуха, не упоминаются: "Для снижения выбросов пыли и металлов при прокаливании глинозема, НДТ заключается в использовании рукавного фильтра или электрофильтра" (Выводы НДТ 2016).

С экономической точки зрения вопрос об использовании технологии рукавных фильтров или электрофильтров может также зависеть от размера установки обжига. В то время как

инвестиционные затраты на системы электрофильтров постоянно растут с увеличением удельного сбора и, следовательно, объемного расхода технологического воздуха и отходящих газов, инвестиции в систему рукавных фильтров обычно начинаются с более высокого уровня, но не так сильно растут с увеличением размера установки (Schneider 2016). Однако, поскольку большинство глиноземных производств - это очень крупные промышленные предприятия, эффект от различий в объеме инвестиций в обе технологии сравнительно невелик. В целом можно отметить, что эксплуатационные расходы рукавных фильтров, связанные с очисткой и обслуживанием, несколько выше, чем у электрофильтров, в то время как объем инвестиций в обе технологии очистки в диапазоне мощностей обычных глиноземных заводов находится в одном и том же диапазоне. Однако точные инвестиционные и технологические затраты в значительной степени зависят от параметров конкретного объекта, поэтому сложно представить обоснованные экономические показатели (Schneider 2016).

4.2 Снижение выбросов при производстве анодов

При производстве угольных анодов, которые являются ключевым компонентом в процессе плавления глинозёма и электролиза в расплавленных солях для получения элементарного алюминия, применяются различные системы обеспыливания на этапах хранения и обработки кокса, его дробления, измельчения и сепарации. Наиболее часто используемой технологией являются рукавные фильтры, которые обеспечивают более высокую эффективность удаления пыли по сравнению с электростатическими фильтрами (ESP). В случаях, когда устанавливаются ESP, в систему предварительной обработки также добавляют циклон. Поскольку кокс, используемый для производства анодов, содержит различные углеводороды, в отходящие газы попадают дополнительные выбросы ЛОС, в частности полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). При наличии паров пека в газах могут применяться сухие коксовые скрубберы, каталитические термические окислители (СТО) или регенеративные термические окислители (RTO). Концепция сухих коксовых скрубберов и термических окислителей будет кратко описана далее, в то время как принципы работы рукавных фильтров и ESP аналогичны описанным ранее.

В технологии сухой очистки порошок вводится и равномерно распределяется в потоке отходящих газов. Материал вступает в реакцию с газообразными веществами или действует как адсорбент, образуя твердое вещество, которое должно быть удалено путем фильтрации (рукавный или электростатический фильтр). Использование реакционной башни повышает эффективность очистки в системе очистки. Для очистки технологических газов при производстве анодов в качестве скруббера обычно используется коксовый порошок. Концепция системы сухой очистки показана на Рис. 8.

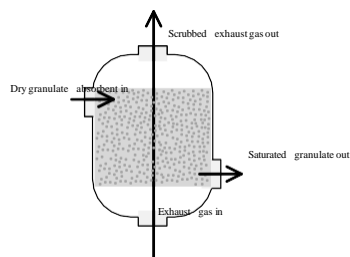


Рисунок 8: Принцип работы системы сухой очистки

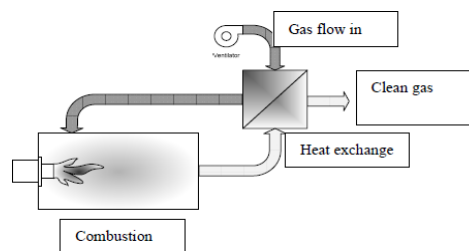


Рисунок 9: Концепция рекуперативного инсинератора (Rijkswaterstaat Environment 2017)

Рекуперативный инсинератор - это термический инсинератор с дополнительным теплообменником. С помощью теплообменника неочищенный воздух предварительно нагревается газами горения, в результате чего до 80% выделяемого тепла становится доступным для использования. В регенеративной печи два или более керамических слоя аккумулируют тепло очищенного газа и подогревают неочищенный газ. Термический КПД может достигать 97%.

Основные выбросы ЛОС и фторидов происходят в процессе обжига при производстве анодов (см. также Раздел 1.1.3). Поскольку некоторые анодные заводы используют в качестве сырья переработанные анодные штыбы (содержащие значительное количество фторидов), необходимо предусмотреть возможность восстановления фторидов на этапе последующей обработки. Что касается обработки отходящих газов, то следует различать автономные заводы, на которых производятся только аноды, и заводы, на которых также осуществляется производство глинозема и, в частности, электролиз глинозема для получения элементарного алюминия. Если новый анодный завод связан с заводом по производству первичного алюминия, технологические газы этого завода могут быть объединены с газами электролизных ячеек для процессов очистки с использованием глинозема (см. Раздел 4.3 "Сокращение выбросов при производстве первичного алюминия"). Однако на большинстве существующих заводов газы обрабатываются отдельно в сухих скрубберах с использованием глинозема. Рукавный фильтр собирает образующуюся глиноземную пыль, которая вновь поступает в электролитические электролизёры в процессе электролиза плавленной соли.

Заключения НДТ содержат дополнительную информацию о НДТ при производстве анодов в отношении снижения выбросов в атмосферу, с различием между пастовым заводом, где формируются анодные материалы (обычно из нефтяного кокса, каменноугольного пека или переработанных анодных штыбов), и заводом обжига (см. описание процесса в Разделе 1.1.3). Краткое описание рекомендуемых НДТ и соответствующих уровней выбросов, указанных в заключениях НДТ, приведено в Таблице 9. Как обсуждалось в описании процесса, обжиг анодов часто интегрирован с производством первичного алюминия, что влияет на обработку отходящих газов и соответствующий уровень выбросов.

Таблица 10 относится только к автономным заводам, а значения выбросов интегрированных заводов и соответствующие НДТ приведены в следующем разделе вместе с процессами плавления и электролиза в расплавленных солях.

Таблица 9: НДТ и соответствующие значения выбросов для производства анодов (завод по производству пасты), указанные в европейских заключениях НДТ (BAT Conclusions 2016)

НДТ для завода по производству пасты (формирование анодов)		
<ul style="list-style-type: none"> Для снижения выбросов пыли в атмосферу с пастового завода (удаление коксовой пыли с таких операций, как хранение и измельчение кокса) НДТ предполагает использование рукавного фильтра. Для снижения выбросов пыли и ПАУ в атмосферу с пастового завода (хранение горячего пека, смешивание, охлаждение и формование пасты) НДТ заключается в использовании одного или комбинации методов, приведенных ниже: <ol style="list-style-type: none"> Сухой скруббер с использованием кокса в качестве адсорбента, затем рукавный фильтр Регенеративный или рекуперативный термический окислитель Каталитический термический окислитель 		
Параметр выброса	Процесс	Уровень выбросов мг/Нм ³
Пыль	Хранение горячего пека, смешивание пасты, охлаждение и формование	2-5 (среднесуточное значение)
Бензо(а)пирен (BaP как индикатор ПАУ)	Удаление пыли кокса при операциях, таких как хранение и измельчение кокса	0,001-0,01 (среднее значение за период отбора проб)

Таблица 10: НДТ и соответствующие значения выбросов для производства анодов (автономный пекарный завод), указанные в европейских заключениях НДТ (BAT Conclusions 2016)

НДТ для завода обжига анодов		
Для снижения выбросов пыли, ПАУ и фторидов в атмосферу на автономных заводах по производству анодов рекомендуется использовать предварительную фильтрацию регенеративный термический окислитель и сухой скруббер (например, с использованием известнякового слоя).		
Параметр выброса	Процесс	Уровень выбросов мг/Нм ³
Пыль	Введение анодной пасты в печь и процесс обжига	2-5 (среднесуточное значение)
Бензо(а)пирен (BaP как индикатор ПАУ)	Обжиг при высокой температуре около 1120°C в течение 2 недель	0,001-0,01 (среднее значение за период отбора проб)
HF (фтористый водород)	Обжиг при высокой температуре около 1120°C в течение 2х недель	< 3 (среднесуточное значение)

С точки зрения экономических аспектов снижения выбросов в атмосферу при производстве анодов, то в документе СНДТ (Cusano et al., 2017) приводятся несколько сведений о существующих установках. Установка сухой очистки с рукавным фильтром и производительностью 50 000 м³/ч требует инвестиций в размере около 1,4 млн евро. Затраты на установку RTO-системы той же мощности составят около 4 млн евро. Если использовать RTO только для газа с высоким содержанием пека, а для газа с низкой концентрацией - сухой скруббер, общие инвестиции можно сократить до примерно 3 млн евро при аналогичной мощности. Ежегодные расходы на обслуживание такой системы

составят около 100 тыс. евро. Общие инвестиции в систему очистки на производственной площадке с производительностью 130 тыс. т/год обожжённых анодов с использованием сухого скруббера с последующим рукавным фильтром составляют примерно 10 млн евро (Cusano et al., 2017), в то время как инвестиции в систему RTO/CTO будут значительно выше.

4.3 Сокращение выбросов при производстве первичного алюминия

Плавление и последующий электролиз глинозема до элементарного алюминия являются наиболее энергоёмкими технологическими операциями и вызывают наибольшие прямые и косвенные выбросы, как уже было подсчитано в Разделе 2. На Рисунке 10 представлены основные выбросы в атмосферу, возникающие при обработке технологических газов и вентиляции электролизных помещений (электролизных камер), в то время как дегазация и литьё расплавленного алюминия на последующих этапах вызывают относительно низкие выбросы.

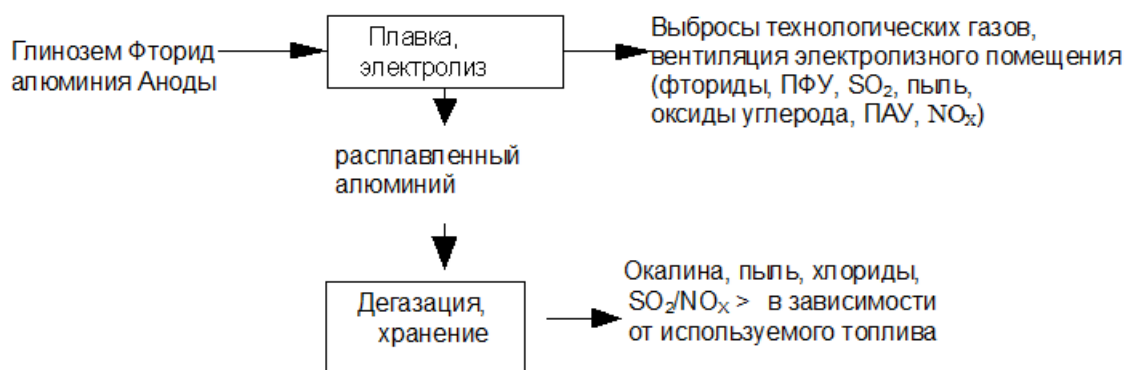


Рисунок 10: Обзор основных выбросов в атмосферу при производстве алюминия (Cusano et al., 2017)

Как уже говорилось в Разделе 2.1, наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают перфторуглероды, выбрасываемые в атмосферу при производстве первичного алюминия. ПФУ могут возникать в процессе восстановления первичного алюминия во время так называемых анодных эффектов. Анодный эффект - это специфический сбой процесса, при котором в ванне электролита растворяется недостаточное количество глинозема. В результате напряжение в ванне повышается выше нормального рабочего диапазона, что приводит к выделению газов, содержащих ПФУ - тетрафторметан (CF₄) и гексафторэтан (C₂F₆). Как уже было описано в Разделах 1.1.3 и 2.1, технологии точечной подачи с предварительно обожжёнными анодами (PFPB) и вертикальные ячейки Содерберга с точечной подачей (PFVSS) в сочетании с: автоматической многоточечной подачей глинозёма, компьютерным управлением электролитическим процессом на основе активных баз данных ячеек, мониторингом рабочих параметров ячеек и автоматическим подавлением анодных эффектов, значительно сократили частоту возникновения анодных эффектов и, следовательно, образование ПФУ. Кроме того, для снижения выбросов фторидов используются системы очистки, описанные в следующих разделах.

Системы от фторидов (scrubbing systems) используют глинозем для для удаления газообразных фторидов из газов, выделяемых электролизными ваннами. Этот "активированный" глинозём, содержащий остаточные фториды, затем используется в процессе восстановления, что позволяет перерабатывать фториды в замкнутом цикле. Значительная часть алюминиевых заводов по всему миру использует такие системы очистки. Однако из-за роста числа производственных объектов в Китае и отсутствия точной информации о применяемых технологиях сложно оценить общий уровень использования систем очистки от фторидов на мировом уровне. Тем не менее, эта технология является общепринятым стандартом в Европе (Cusano et al. 2017) и определена как НДТ в европейском документе Заключений (BAT Conclusions 2016). В Европе оптимальный сбор газов из электролизных ячеек, специальное обучение работников по минимизации неорганизованных выбросов фторидов, а также улучшение технологий ячеек привели к сокращению выбросов фторидов на 50% на тонну произведённого алюминия в период с 1990 по 2010 год (около 80% с 1960-х годов). Отрасль обязалась сократить выбросы фторидов ещё как минимум на 35% в период с 2006 по 2020 год (World Aluminium 2017). Альтернативой для улавливания фторидов является очистка с использованием измельчённого известняка или мокрая очистка пресной водой, где вода циркулирует в замкнутом цикле с регулярным сбросом части объёма для поддержания необходимых условий. Преимуществом мокрых скрубберов является дополнительное удаление SO₂ из отходящих газов. Однако мокрые скрубберы в основном используются в скандинавской алюминиевой промышленности, так как они требуют значительных объёмов воды, а также очистки сточных вод и учета перекрёстных эффектов на другие среды. Таким образом, применимость систем мокрой очистки может быть ограничена при очень высоких расходах отходящих газов (из-за значительного количества образующихся отходов и сточных вод) и в засушливых районах (из-за большого объема необходимой воды). Для снижения выбросов SO₂ рекомендуется использовать материалы с низким содержанием серы для производства анодов². В Таблице 7 показан наиболее высокий потенциал сокращения выбросов при производстве первичного алюминия с использованием систем мокрой очистки для процесса Содерберга и систем усиленного отсоса (BSS) для увеличения объема обрабатываемого технологического воздуха с предварительно обожжёнными анодами (PFPB) в сочетании с сухим скруббером и рукавным фильтром.

Таблица 11: Общие выбросы в атмосферу при производстве первичного алюминия (выплавка и электролиз) с использованием технологий снижения выбросов, которые в настоящее время находятся на самом высоком уровне, а именно: мокрая очистка для процесса Содерберга и BSS в сочетании с сухой очисткой глинозёмом для процесса с предварительно обожжёнными анодами (Cusano et al., 2017)

Параметр выброса	Предварительно обожжённые аноды (PFPB)	Содерберг
Общие фториды (кг/кг Al)	250-450*10 ⁻⁶	300-600*10 ⁻⁶
Пыль (кг/кг Al)	200-600*10 ⁻⁶	800-1400*10 ⁻⁶
SO ₂ (кг/кг Al)	0.01-0.025	не сообщается

² Аноды, содержащие менее 1,5% серы в среднем за год, могут быть произведены при соответствующем подборе используемого сырья. Для стабильной работы процесса электролиза требуется минимальное содержание серы в анодах на уровне 0,9% в среднем за год (BAT Conclusions, 2016)

В дополнение к документу СНДТ (Cusano et al., 2017), Заключение НДТ содержат соответствующую информацию об уровнях выбросов (BAT Conclusions, 2016), особенно в отношении правил для новых заводов и сравнения с существующими производственными объектами. Несмотря на то, что процесс Содерберга имеет незначительное значение для новых заводов (см. техническое описание в Разделе 1.1.3), Заключение НДТ содержат техническую информацию и соответствующие значения выбросов в атмосферу для обеих технологий. НДТ, касающиеся выбросов в атмосферу, обобщены в Таблице 12, а в Таблице 13 представлен обзор соответствующих значений выбросов для существующих и новых заводов.

Таблица 12: Список НДТ для снижения выбросов в атмосферу, приведенный в европейских Заключениях НДТ (BAT Conclusions, 2016) для процессов с предварительно обожжёнными анодами (PFPB) и процесса Содерберга. Соответствующие значения выбросов приведены в Таблице 13

Предварительно обожжённые аноды (PFPB)	Содерберг
<ul style="list-style-type: none"> • Автоматическая многоточечная подача глинозема • Полное закрытие ячейки колпаком и адекватны скорости отвода отходящих газов (для направления отходящих газов в скруббер с последующим рукавным фильтром) с учетом образования фтора из ванны и расхода углеродного анода • Система усиленного всасывания, подключенная к системе очистки • Минимизация времени на замену анодов и другие работы, требующие снятия колпаков с ячеек • Эффективная система управления процессом, позволяющая избежать отклонений, которые в противном случае могли бы привести к увеличению выбросов (автоматическое подавление анодного эффекта) • Использование программируемой системы для эксплуатации и обслуживания ячеек • Использование эффективных методов очистки на заводе по сборке анодов для восстановления фторидов и углерода. 	<ul style="list-style-type: none"> • Использование пасты с содержанием пека от 25% до 28% (сухая паста) • Модернизация конструкции коллекторов для обеспечения закрытой точечной подачи и улучшения эффективности сбора отходящих газов • Технология точечной подачи глинозема. Точечная подача глинозема позволяет избежать регулярного разрушения корки (как, например, при ручной боковой подаче или подаче через разлом), что снижает связанные выбросы фторидов и пыли. • Увеличенная высота анодов в сочетании с обработкой в скруббере с использованием глинозёма в качестве абсорбента и последующим рукавным фильтром. Увеличенная высота анодов способствует снижению температуры на верхней части анода, что приводит к уменьшению выбросов в атмосферу.
<ul style="list-style-type: none"> • Хранение удалённых анодов в специальном отсеке рядом с ячейкой, подключённом к системе очистки в скруббере, или хранение анодных штыбов в герметичных контейнерах (не применимо для существующих заводов,). 	<ul style="list-style-type: none"> • Закрытие верхней части анода колпаком при использовании анодов с высокой плотностью тока подключённое к системе скруббера.

Как показано в Таблице 13, значения выбросов для утверждения и разрешения новых производственных мощностей в соответствии с европейскими Заключениями НДТ (BAT Conclusions, 2016), находятся в верхнем диапазоне уровней выбросов, указанных для

процессов с точечной подачей и предварительно обожжёнными анодами (PFPB) в документе BREF (см. Таблицу 11) в отношении пыли и фторидов. Это подчёркивает актуальность документа СНДТ, что также было подтверждено отраслевыми экспертами в ходе опроса. Только в случае выбросов SO₂, для снижения которых наиболее эффективной технологией являются мокрые скрубберы (хотя обычно применяются сухие системы), значения выбросов, указанные в документе СНДТ для некоторых существующих заводов, в отдельных случаях превышают уровни, установленные в Заключениях НДТ.

Таблица 13: НДТ и соответствующие значения выбросов при выплавке алюминия и электролизе, собираемые из электролизных камер и вентиляционных отверстий на крыше, как указано в Заключениях НДТ (BAT Conclusions 2016). Мокрые скрубберы используются только в случае очень высоких скоростей отходящих газов, из-за воздействия на другие среды и при наличии больших объёмов воды.

Параметр выброса	НДТ определенный в Заключениях ЕС	Уровень выбросов кг/кг Al	
		существующая	новая установка
Пыль	Сухой скруббер с использованием глинозёма в качестве адсорбента рукавного фильтра (возможно, дополнительно мокрый скруббер, если применимо)	1200*10 ⁻⁶	600*10 ⁻⁶
Общие фториды, в основном HF		600*10 ⁻⁶	350*10 ⁻⁶
SO ₂	Использование анодов с низким содержанием серы и, при необходимости, мокрой системы очистки	0.0025-0.015	0.0025-0.015
Перфторуглероды, в основном Перфторэтан и перфторметан	<ul style="list-style-type: none"> • Автоматическая многоточечная подача глинозема • Автоматическое подавление анодного эффекта • Компьютерное управление процессом электролиза на основе баз данных активных ячеек и мониторинга параметров работы ячеек 	не сообщается	не сообщается

Что касается экономических аспектов борьбы с выбросами в атмосферу в процессе плавки и электролиза, Cusano et al. (2017) приводят пример возможного нового центра обработки газов, рассматривавшегося во Франции в 2012 году. Для современного завода PFPB с мощностью 260 000 тонн алюминия в год общие инвестиционные затраты на технологию снижения выбросов с использованием обычных систем очистки составят около 120 миллионов евро (две установки стоимостью 60 миллионов евро каждая). Затраты на модернизацию существующего завода будут выше. Если включить систему усиленного отсоса BSS (см. справочные данные в Таблице 7), то потребуются дополнительные инвестиции в размере 12 миллионов евро для добавления второй сети и набора клапанов, фильтров и вентиляторов на новой установке; и в два раза больше или даже больше (Cusano et al. 2017).

5 Заключение

Целью данного документа было представить краткий обзор современного состояния производства первичного алюминия и соответствующих уровней выбросов в атмосферу, а также соответствующих технологий снижения выбросов на основе текущего европейского документа СНДТ для цветных металлов (Cusano et al. 2017) и дополнительных различных литературных источников и экспертных оценок. Сравнение уровней выбросов с европейскими Заключениями НДТ показало, что документ СНДТ является актуальным и содержит обширную информацию о соответствующих технологиях снижения выбросов. Это также подтвердили сотрудники отрасли и эксперты из природоохранных ведомств. Только в случае выбросов SO₂, системы сухой очистки для алюминиевых заводов, описанные в документе СНДТ, могут превышать текущие значения выбросов, указанные в выводах НДТ. Однако значения выбросов SO₂ в значительной степени зависят от содержания серы в анодах и поэтому также могут регулироваться использованием анодов с низким содержанием серы.

Что касается затрат на технологии снижения выбросов, то в данном отчете приводятся несколько примеров по инвестициям, в основном из европейского документа СНДТ. Однако, поскольку затраты или объем инвестиций, как правило, указываются для завода в целом, а не для конкретных технологий снижения выбросов, предоставление точных данных по этому вопросу затруднено.

6 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- BAT Conclusions (2016): BAT CONCLUSIONS FOR THE NON-FERROUS METALS INDUSTRIES, Official Journal of the European Union, European Commission, Brussels, Belgium. Available online at https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/nfm_conclusions_english_30_6_16.pdf
- Boin, U.M.J., Bertram, M. Melting standardized aluminum scrap: A mass balance model for Europe. JOM 57, 26–33 (2005). <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0164-4>
- Cusano, G.; Gonzalo, M. R.; Farrell, F.; Remus, R.; Roudier, S.; Delgado Sancho, L. (2017): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the main Non-Ferrous Metals Industries (EUR 28648 EN). Available online at <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/non-ferrous-metals-industries-0>
- Harrison, Stephen; Schéele, Joachim von (2009): Emission monitoring and reduction in aluminium production. Aluminium International Today. Available online at <http://hiq.linde-gas.com/en>
- Kuenen, J.; Berdowski, J.; van der Most, P.; Mulder, W.; Bloos, J. P.; Pacyna, J. M. et al. (2016): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook, aluminium production. LRTAP / EEA: Available online at: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>
- Primary World Aluminium (2019): Aluminium for Future Generations: Available online at: <http://primary.world-aluminium.org/aluminium-facts/greenhouse-gases/>
- The Aluminium Association (2018): Secondary Production. Available online at <https://www.aluminium.org/industries/production/secondary-production>
- The International Aluminium Institute (2018a): Reduction. Available online at <http://primary.world-aluminium.org/index.php?id=286&L=0>
- The International Aluminium Institute (2018b): Refining Process. Available online at <http://bauxite.world-aluminium.org/index.php?id=208&L=0>
- UC RUSAL (2018): Aluminium Production. How Aluminium is produced. Available online at https://www.aluminiumleader.com/production/aluminum_production/
- Umweltbundesamt (2018): ProBas - Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme. MetallAluminium-DE-2020. Available online at <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7BDD29CB08-8E9B-4E7A-A5F8-B74E631F2290%7D> See also: <https://iir-de.wikidot.com/2-c-3-aluminum-production>
- US Geological Survey (2018a): Aluminium. Mineral Commodity Summaries. Available online at <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/aluminium/mcs-2018-alumi.pdf>
- US Geological Survey (2018b): Bauxite and Alumina. Mineral Commodity Summaries. Available online at <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bauxite/mcs-2018-bauxi.pdf>
- Schneider, Matthias (2016): ESP and Fabric Filter Technology for Dedusting - Comparison and Optimization. Available online at https://www.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/STEAG_Optimization%20measures%20for%20ESP%20systems_161112.pdf
- WirtschaftsVereinigungMetalle (2018): Produktion von Primär- und Sekundäraluminium in Deutschland in den Jahren 2007 bis 2017. Edited by Statista. Available online at <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197960/umfrage/produktion-von-primar-und-sekundaeraluminium-in-deutschland/>
- World Aluminium (2017): Results of the 2016 Anode Effect Survey: Report on the Aluminium Industry's Global Perfluorocarbon Gases Emissions. Available online at http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2017/07/26/2016_anode_effect_survey_result_2017.pdf
- Rijkswaterstaat Environment (2017): Fact sheets on air emission abatement techniques Available online at: https://www.infomil.nl/publish/pages/116596/fact_sheets_on_air_emission_abatement_techniques_-_final_2009_02_20.pdf