



Справочный неофициальный технический  
документ по методам сокращения  
выбросов загрязняющих веществ при  
производстве цемента и определению  
затрат на них

Справочный неофициальный технический документ  
ЦГ ТЭВ  
Декабрь 2020

Подготовлено Citera (Научно-технический  
секретариат ЦГ ТЭВ)  
Надин Аллеманд и Этьен Фотрен



# Справочный неофициальный технический документ по методам сокращения выбросов загрязняющих веществ при производстве цемента и определению затрат на них

Декабрь 2020

Дополнительная информация

Научно-технический секретариат ЦГ ТЭВ

Надин Аллеманд (руководитель научно-технического секретариата ЦГ ТЭВ)

Этьен Фотрен

Citepa

42 Rue de Paradis

75010 Paris

[nadine.allemand@citepa.org](mailto:nadine.allemand@citepa.org)

[etienne.feutren@citepa.org](mailto:etienne.feutren@citepa.org)

## **Благодарности:**

Никос НИКОЛАКАКОС, SEMBUREAU

Катарина Фаллманн, Бригитте Винтер - Австрийское агентство по охране окружающей среды (Umweltbundesamt)

Майя БЕРНИКЕ - Немецкое агентство по охране окружающей среды (Umweltbundesamt)

## Содержание

Благодарности: .....	2
Краткое содержание .....	8
1. Введение.....	10
2. Общая информация о деятельности .....	10
3. Выбросы загрязняющих веществ при производстве цемента и предельные уровни выбросов (ELV) в протоколах .....	11
4. Наилучшие доступные техники.....	14
NO <sub>x</sub> .....	14
SO <sub>2</sub> .....	19
Диоксины .....	20
5. Определение эталонной установки/процесса и затрат.....	21
6. Резюме затрат на снижение выбросов.....	22
Пыль .....	22
NO <sub>x</sub> .....	23
SO <sub>2</sub> .....	25
7. Приложение 1 – Гипотезы, использованные для оценки затрат на снижение выбросов пыли .....	27
8. Приложение 2 – Гипотезы, использованные для оценки затрат на снижение выбросов NO <sub>x</sub> .....	29
9. Приложение 3 - Метод и гипотезы, использованные для оценки затрат на техники снижения выбросов SO <sub>2</sub> .....	31
10. Приложение 4 - Принципы оценки затрат .....	33
11. Список использованных источников .....	35

## Список таблиц

Таблица 1: Производство цемента в некоторых странах ЕС (млн тонн цемента) [1].....	11
Таблица 2: Предельные уровни выбросов NOx для цементных заводов в соответствии с приложением V Гётеборгского протокола [5].....	12
Таблица 3: Предельные уровни выбросов пыли для цементных заводов в соответствии с приложением X Гётеборгского протокола [5].....	12
Таблица 4: Предельные уровни выбросов пыли и тяжелых металлов в соответствии с Орхусским протоколом с поправками [6].....	13
Таблица 5: Соответствующие НДТ уровни выбросов NOx, из отходящих отходящих газов в процессах обжига в печи и/или предварительного нагрева/предварительного обжига в цементной промышленности [24].....	17
Таблица 6: Соответствующие НДТ уровни выбросов для проскока NH3, в отходящих газах при применении СНКВ [24].....	18
Таблица 7: Предельные значения выбросов пыли и тяжёлых металлов согласно [7].....	19
Таблица 8: Соответствующие НДТ уровни выбросов металлов из отходящих газов при обжиге в печи .....	19
Таблица 9: Соответствующие НДТ уровни выбросов SO2[24] .....	20
Таблица 10: Размер эталонной установки.....	21
Таблица 11: Капитальные и эксплуатационные затраты на снижение выбросов пыли с использованием РФ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день [23].....	22
Таблица 12: Общие годовые затраты и коэффициент рентабельности для РФ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день .....	22
Таблица 13: Затраты на снижение выбросов NOx с помощью СНКВ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день [23].....	23
Таблица 14: Общие годовые затраты и коэффициент рентабельности для СНКВ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день .....	23
Таблица 15: Затраты на снижение выбросов NOx с помощью СКВ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день [23].....	24
Таблица 16: Общие годовые затраты и коэффициент рентабельности для СКВ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день .....	24
Таблица 17: Основные результаты по сокращению выбросов NOx в цементном секторе ЕС согласно ECOFYS [9].....	25
Таблица 18: Затраты на снижение выбросов SO2 за счет добавления абсорбента на заводе мощностью 3000 т клинкера в день.....	25
Таблица 19: Общие годовые затраты и коэффициент эффективности затрат для добавления абсорбента на заводе мощностью 3000 т клинкера в день.....	25
Таблица 20: Затраты на сокращение выбросов SO2 с помощью WFGD на заводе мощностью 3000 т клинкера в день.....	26
Таблица 21: Общие годовые затраты и коэффициент экономической эффективности для мокрой сероочистки отходящих газов (WFGD) на заводе мощностью 3000 т клинкера в день .....	26

## Список рисунков

Рисунок 1: Эффективность СНКВ в зависимости от температуры [11] .....	15
Рисунок 2: Динамика оснащения заводов технологиями СНКВ и другими методами в Европе ([12] и информация СЕМBUREAU).....	16
Рисунок 3: Возможности различных техник по снижению выбросов NOx на цементных заводах [11] (MSC: многоступенчатое сжигание). .....	17

## Список основных сокращений и аббревиатур

AGP	Гётеборгский протокол с поправками 2012 года (Amended Gothenburg Protocol)
НДТ (BAT)	Наилучшая доступная техника (Best Available Technology)
BAT AELs	Соответствующие НДТ уровни выбросов (BAT Associated Emission Levels)
CaO	Негашеная известь (Quicklime)
Ca(OH) <sub>2</sub>	Гашеная известь (Slaked lime)
Ca/S	Соотношение кальция/серы (Ratio Calcium/Sulphur)
CEIP	ЕПЕП Центр по кадастрам и прогнозам выбросов (EMEP Centre on Emission Inventories and Projections)
КТЗВБР (CLRTAP)	Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution)
CO	Монооксид углерода (Carbon monoxide)
ECE	Европейская экономическая комиссия (Economic Commission for Europe)
ГЭ ТЭВ (EGTEI)	Группа экспертов по технико-экономическим вопросам (Expert Group on Techno Economic Issues)
ELV	Предельные уровни/значения выбросов (Emission Limit Values)
ЕМЕП (EMEP)	Европейская программа мониторинга и оценки (European Monitoring and Evaluation Programme)
РФ (FF)	Рукавный фильтр (Fabric filter)
HCl	Хлорид водорода (Hydrogen chloride)
HF	Фторид водорода (Hydrogen fluoride)
MSC	Многоступенчатое сжигание (Multi-stage combustion)
NH <sub>3</sub>	Аммиак (Ammonia)
NO <sub>x</sub>	Оксиды азота (Nitrogen Oxides)
ПХБ (PCB)	Полихлорированные бифенилы (Polychlorinated biphenyls)
ПХДД (PCDD)	Полихлорированные дибензо-п-диоксины (Polychlorinated dibenzo-p-dioxins)
ПХДФ (PCDF)	Полихлорированные дибензофураны (Polychlorinated dibenzofurans)
СКВ (SCR)	Селективное каталитическое восстановление (Selective Catalyst Reduction)
СНКВ (SNCR)	Селективное некаталитическое восстановление (Selective Non-Catalytic Reduction)
SO <sub>2</sub>	Диоксид серы (Sulphur dioxide)
ЦГ ТЭВ (TFTEI)	Целевая группа по технико-экономическим вопросам (Task Force on Techno Economic Issues)
ТОС	Общие органические соединения (Total organic compounds)

ОВЧ (TSP)	Общее содержание взвешенных частиц (Total Suspended Particles)
UBA	Umweltbundesamt
ЕЭК ООН (UNECE)	Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций (United Nations Economic Commission for Europe)
ЛОС (VOC)	Летучие органические соединения (Volatile Organic Compounds)

## Краткое содержание

В соответствии с задачами, включенными в пересмотренный мандат Целевой группы по технико-экономическим вопросам (ЦГ ТЭВ), определенными в Решении 2018/7, принятом на тридцать восьмой сессии Исполнительного органа (ИО) Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (КТЗВБР)<sup>1</sup>, настоящий отчет охватывает следующий результат:

2 (а) Регулярное обновление и оценка информации о техниках снижения выбросов для уменьшения атмосферных выбросов SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ЛОС, ОВЧ, включая черный углерод, тяжелые металлы и стойкие органические загрязнители (ПОХ) как от стационарных, так и от мобильных источников, включая затраты на эти техники;

Методы сокращения выбросов в цементной промышленности рассматривались ЦГ ТЭВ несколько лет назад, но потребовалось обновить всю ранее представленную информацию. Настоящий документ заменяет все предыдущие.

В обновленном отчете представлена самая актуальная информация о методах снижения выбросов, их эффективности и затратах.

Документ в основном сосредоточен на выбросах NO<sub>x</sub>, которые могут быть значительными на предприятиях, не применяющих меры для их снижения. Выбросы NO<sub>x</sub> зависят от различных параметров, таких как сырье, вид топлива, тип горения, соотношение воздуха и топлива и температура пламени. Документ также рассматривает выбросы ОВЧ и SO<sub>2</sub>, которые зависят от общего содержания серных соединений и типа используемого процесса, что в первую очередь определяется содержанием летучей серы в сырье и, возможно, в топливе. Также затрагиваются диоксины и тяжелые металлы.

Наилучшая доступная техника (НДТ) для снижения выбросов NO<sub>x</sub> включает первичные меры в сочетании с многоступенчатым сжиганием и технологиями СНКВ или СКВ. При использовании этих техник можно достичь уровня выбросов в диапазоне 200–500 мг/Нм<sup>3</sup> (среднесуточные значения). Для пыли и тяжелых металлов НДТ также представляет собой сочетание первичных и вторичных мер. Выбросы пыли при обжиге в печах, охлаждении и помоле можно снизить до концентрации < 10 мг/Нм<sup>3</sup> – 20 мг/Нм<sup>3</sup> (среднесуточное значение, 10 об.% O<sub>2</sub>), из других процессов — до концентрации < 10 мг/Нм<sup>3</sup>. Для SO<sub>2</sub> первый шаг заключается в оптимизации процессов, таких как оптимизация процесса обжига клинкера, включая сглаживание работы печи, равномерное распределение горячего материала в подъемной трубе печи и предотвращение восстановительных условий в процессе горения, а также выбор сырья и топлива. Однако, если исходный уровень выбросов SO<sub>2</sub> достаточно высокий, необходимо использовать различные системы очистки отходящих газов. В цементной промышленности при применении адаптированных техник, ожидается достижение концентраций в диапазоне 50–400 мг/Нм<sup>3</sup> (среднесуточное значение, 10 об.% O<sub>2</sub>) техник.

Затраты на техники снижения выбросов были оценены с учетом среднего цементного завода с производительностью 3000 тонн клинкера в день и рабочим временем 7680 часов в год.

При сроке службы 20 лет и норме амортизации 4 %, коэффициенты эффективности затрат варьируются следующим образом (все концентрации при 10 об.% O<sub>2</sub>):

- Пыль: от 5200 до 9100 €/т предотвращенной пыли для снижения концентрации пыли с 56 до 5 мг/Нм<sup>3</sup> с использованием рукавного фильтра. Годовые затраты на



тонну клинкера составляют от 0,6 до 1,1 €/т клинкера.

- NO<sub>x</sub>: от 460 до 1250 €/т предотвращенного NO<sub>x</sub> при использовании СНКВ для снижения выбросов с 1200 до 400–800 мг/Нм<sup>3</sup>. Годовые затраты на тонну клинкера составляют от 0,45 до 1,25 €/т клинкера.
- NO<sub>x</sub>: от 510 до 1110 €/т предотвращенного NO<sub>x</sub> при использовании СКВ для снижения выбросов с 1200 до 200 мг/Нм<sup>3</sup>. Годовые затраты на тонну клинкера составляют от 1,2 до 2,5 €/т клинкера.
- SO<sub>2</sub>: от 690 до 1650 €/т предотвращенного SO<sub>2</sub> при использовании FGD для снижения выбросов с 600–1000 до 400 мг/Нм<sup>3</sup>. Годовые затраты на тонну клинкера составляют от 0,3 до 0,8 €/т клинкера.

Данные о затратах были обновлены благодаря анкете, направленной Европейской цементной ассоциации (CEMBUREAU), и предоставленным ответам. Документ был распространен среди экспертов ЦГ ТЭВ, а также экспертов из ведомств по охране окружающей среды Германии и Австрии (UBA), которые предоставили свои отзывы.

# 1. Введение

Данный документ содержит информацию о доступных техниках снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при производстве цемента. В нем представлены данные о выбросах основных загрязняющих веществ, наилучших доступных техниках (НДТ) и стоимости техник снижения выбросов для SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и ОВЧ.

В соответствии с задачами, включенными в пересмотренный мандат Целевой группы по технико-экономическим вопросам (ЦГ ТЭВ), определенный в Решении 2018/7 Исполнительного органа (ИО) Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (КТЗВБР)<sup>2</sup>, отчет охватывает следующее задание:

2 (а) Обновление и оценка на регулярной основе информации о техниках снижения выбросов для уменьшения атмосферных выбросов SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ЛОС, ОВЧ, включая черный углерод, тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей (СОЗ) от стационарных и мобильных источников, включая стоимость таких техник; Производство цемента рассматривалось в предыдущем справочном документе, разработанном в 2005 году [4]. В 2011 году была предпринята попытка обновить этот документ в рамках пересмотра Гётеборгского протокола, но обновленный документ не был корректно завершен из-за недостатка новых данных о стоимости.

В 2019/2020 годах была собрана новая информация. Этот документ обновляет предыдущую информацию с учетом последних доступных данных. Теперь информация о наилучших доступных техниках в этой области стала более доступной, и были получены данные о затратах.

Первый проект, разработанный для рассылки среди экспертов ЦГ ТЭВ (как из промышленности, так и из административных структур) для получения комментариев, был подготовлен в апреле 2019 года. Также был разработан опросник для сбора данных о стоимости.

Настоящая версия включает комментарии, полученные от Германского и Австрийского ведомств по охране окружающей среды (UBA), ассоциации CEMBUREAU и одного из производителей оборудования. Цифры стоимости основаны на данных, полученных от CEMBUREAU [23].

Решение о пересмотре Гётеборгского протокола с поправками 2012 года (AGP) было принято на 39-й сессии Исполнительного органа (ИО) в декабре 2019<sup>3</sup>. Программа работы и график предполагаются к официальному утверждению на 40-й сессии ИО в декабре 2020 года.

Этот документ актуален для пересмотра AGP. Он заменяет предыдущий документ, разработанный ЦГ ТЭВ в 2005 году.

## 2. Общая информация о деятельности

Цемент – это гидравлический вяжущий материал, который реагирует с водой с образованием гидратов силикатов кальция. Известны различные виды цемента [4]. Термин «портландцемент» обычно относится к цементу, который состоит полностью или преимущественно из цементного клинкера. Портландцемент со шлаком, портландцемент с пуццоланом и т. д. состоят из клинкера и молотой добавки. В качестве добавок в производстве цемента используются, например, зола-уноса и шлак от производства чугуна и стали.

*ЦГ ТЭВ – Цемент – декабрь 2020*

<sup>2</sup> Исполнительный орган – Тридцать восьмая сессия (ЕЭК, 2019), Женева, 10–14 декабря 2018 года.

<sup>3</sup> Решение 2019/4. Пересмотр Гётеборгского протокола, с поправками 2012 года. ECE/EV.AIR/144/Add.1. Исполнительный орган – Тридцать девятая сессия – 9–13 декабря 2019 года

Согласно данным CEMBUREAU [1], в 2016 году объем производства цемента в ЕС составил 169,1 млн тонн. В 2010 году этот показатель составлял 192,1 млн тонн, а в 2008 году – 250,8 млн тонн. В 2016 году Германия произвела 32,7 млн тонн цемента, Италия – 19,3 млн тонн, Франция – 15,9 млн тонн, а Соединенное Королевство – 9,4 млн тонн (Таблица 1).

Мировое производство цемента составляет 4,65 миллиарда тонн. На Китай приходится 51,9 % мирового производства.

**Таблица 1: Производство цемента в некоторых странах ЕС (млн тонн цемента) [1]**

Страна	2001	2008	2010	2015	2016
Франция	19,1	21,2	18,0	15,6	15,9
Италия	39,8	43,0	34,4	20,8	19,3
Германия	32,1	33,6	29,9	31,1	32,7
Соединенное Королевство	11,9	10,5	7,9	9,6	9,4

### **3. Выбросы загрязняющих веществ при производстве цемента и предельные уровни выбросов (ELV) в протоколах**

В регионе ЕЭК ООН, охваченном Конвенцией по загрязнению воздуха, данные о выбросах загрязняющих веществ доступны на веб-сайте ЕПЕП [2]<sup>4</sup>.

Однако невозможно выделить только выбросы цементной промышленности, поскольку выбросы цемента представлены в нескольких строках без возможности детального анализа [2].

Производство цемента осуществляется в несколько этапов, включая [3]:

- подготовку сырьевых материалов (дробление, измельчение, сушка, гомогенизация);
- обжиг смеси сырьевых материалов для производства цементного клинкера;
- подготовку других компонентов цемента;
- измельчение и смешивание компонентов цемента.

Производство цемента сопровождается выбросами таких загрязняющих веществ, как [3]:

- NO<sub>x</sub> и другие соединения азота;
- SO<sub>2</sub> и другие соединения серы;
- пыль;
- общие органические соединения (ТОС), включая летучие органические соединения (ЛОС);
- полихлорированные дибензо-п-диоксины и дибензофураны (PCDD и PCDF);
- другие стойкие органические загрязнители, такие как полициклические ароматические углеводороды и полихлорированные бифенилы (ПХБ);

- металлы и их соединения, включая ртуть (Hg) и ее соединения;
- фтористый водород (HF);
- хлористый водород (HCl);
- угарный газ (CO);
- аммиак (NH<sub>3</sub>) в качестве остаточного аммиака при использовании СНКВ или СКВ для снижения выбросов NO<sub>x</sub>.

В рамках данного документа, разработанного в контексте Конвенции ЕЭК ООН по загрязнению воздуха и ее протоколов, основное внимание уделяется выбросам SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, пыли, тяжелых металлов (Hg, Pb и Cd) и PCDD/DF.

Гётеборгский протокол с поправками 2012г. устанавливает следующие ELV для производства цемента [5]. Эти ELV являются обязательными (статья 3.2).

**Таблица 2: Предельные уровни выбросов NO<sub>x</sub> для цементных заводов в соответствии с приложением V Гётеборгского протокола [5]**

**Предельные значения выбросов NO<sub>x</sub>, образующихся при производстве цементного клинкера<sup>a</sup>**

<i>Вид установки</i>	<i>ПЗВ для NO<sub>x</sub> (мг/м<sup>3</sup>)</i>
В целом (существующие и новые установки)	500
Существующие лепольные печи и длинные карусельные печи, в которых не сжигается никаких отходов	800

<sup>a</sup> Установки для производства цементного клинкера в карусельных печах мощностью > 500 Мг/день или в других печах мощностью >50 Мг/день. Базовое содержание O<sub>2</sub> – 10%.

**Таблица 3: Предельные уровни выбросов пыли для цементных заводов в соответствии с приложением X Гётеборгского протокола [5]**

**Предельные значения для выбросов пыли при производстве цемента<sup>a</sup>**

	<i>ПЗВ для пыли (мг/м<sup>3</sup>)</i>
Установки для производства цемента, печи, мельницы и клинкерные холодильники	20

<sup>a</sup> Установки для производства цементного клинкера в карусельных печах мощностью > 500 Мг/сутки или в других печах мощностью > 50 Мг/сутки. Базовое содержание кислорода составляет 10%.

Протокол по тяжелым металлам требует, чтобы каждая сторона снизила свои общие годовые выбросы ртути (Hg), кадмия (Cd) и свинца (Pb) в атмосферу по сравнению с уровнем выбросов в базовом году, указанным в приложении I (1990 год или период с 1985 по 1995 год), принимая эффективные меры, соответствующие её конкретным условиям [6].

Каждая сторона должна не позднее сроков, указанных в приложении IV Протокола, применять:

- (a) Наилучшие доступные техники (НДТ), принимая во внимание описание НДТ в

приложении III, для каждого нового стационарного источника в рамках основных категорий стационарных источников, для которых руководство по НДТ [7] определяет такие техники;

(b) Предельные уровни выбросов (ELV), указанные в приложении V (см. таблицу 4 для цементного производства), для каждого нового стационарного источника в рамках основных категорий стационарных источников. Сторона может, как альтернативу, применять различные стратегии сокращения выбросов, достигающие эквивалентных общих уровней выбросов;

(c) Наилучшие доступные техники, принимая во внимание приложение III, для каждого существующего стационарного источника в рамках основных категорий стационарных источников, для которых руководство, принятое сторонами на сессии Исполнительного органа, определяет НДТ. Сторона может, как альтернативу, применять различные стратегии сокращения выбросов, достигающие эквивалентных общих сокращений выбросов;

(d) Предельные уровни выбросов, указанные в приложении V, для каждого существующего стационарного источника в рамках основных категорий стационарных источников, насколько это технически и экономически осуществимо. Сторона может, как альтернативу, применять различные стратегии сокращения выбросов, достигающие эквивалентных общих сокращений выбросов.

**Таблица 4: Предельные уровни выбросов пыли и тяжелых металлов в соответствии с Орхусским протоколом с поправками [6]**

<i>ELV for dust (mg/m<sup>3</sup>)<sup>a</sup></i>	
Cement installations, kilns, mills and clinker coolers	20
Cement installations, kilns, mills and clinker coolers using co-incineration of waste	20

<sup>a</sup> Limit values refer to an oxygen content of 10%.

В Гётеборгском протоколе отсутствуют предельные уровни выбросов для SO<sub>2</sub> для цементных заводов.

## 4. Наилучшие доступные техники

### NO<sub>x</sub>

В процессе производства цемента выбросы NO<sub>x</sub> зависят от различных параметров, таких как сырьё, тип топлива, тип сжигания, коэффициент подачи воздуха и температура пламени. Для снижения выбросов NO<sub>x</sub> могут быть реализованы следующие меры [8].

#### Первичные меры:

Среди первичных мер охлаждение пламени, горелки с низким уровнем выбросов NO<sub>x</sub>, ступенчатое сжигание, сжигание в средней части печи и добавление минерализаторов к сырью являются основными технологиями, применяемыми на цементных заводах [8]:

- (a) *Охлаждение пламени* достигается добавлением воды к топливу или непосредственно в пламя. Это снижает температуру и, соответственно, ограничивает образование NO<sub>x</sub>;
- (b) *Добавление минерализаторов*, таких как фтор, в сырьё также позволяет снизить температуру зоны спекания, что уменьшает образование NO<sub>x</sub>;
- (c) *Горелки с низким уровнем выбросов NO<sub>x</sub>* позволяют снизить выбросы NO<sub>x</sub> во время процессов сжигания. Это достигается за счёт холодного сжигания с внутренней или внешней рециркуляцией отходящих газов. Снижение NO<sub>x</sub> до 35 % возможно при успешных установках, а уровни выбросов 500–1000 мг/Нм<sup>3</sup> в исходящих отходящих газах были зафиксированы при использовании этой техники. Соответствующие НДТ уровни выбросов NO<sub>x</sub> из отходящих газов обжиговых печей и/или систем предварительного нагрева/предварительного кальцинирования в цементной промышленности приведены в таблице 5 [3];
- (d) *Ступенчатое сжигание*: первый этап сжигания происходит во вращающейся печи. Второй этап – это горелка на входе в печь, которая разрушает оксиды азота, образованные на первом этапе. На третьем этапе топливо подаётся в кальцинатор вместе с количеством третичного воздуха, что снижает образование NO<sub>x</sub> из топлива и уменьшает NO<sub>x</sub>, выходящий из печи. На четвёртом этапе оставшийся третичный воздух подаётся в систему для остаточного сжигания. Технология ступенчатого сжигания может использоваться только в печах с предварительным кальцинатором;
- (e) *Сжигание в средней части печи* применяется в длинных мокрых или сухих печах. Оно создаёт восстановительную зону за счёт впрыска топлива в промежуточной точке системы печи. На некоторых установках использование этой техники позволило достичь сокращения NO<sub>x</sub> на 20–40 % [3].

Как указано в источнике [12], оптимальные условия для предотвращения выбросов NO<sub>x</sub> часто противоречат лучшим настройкам работы печи. Этот подход также имеет ограничения, в основном из-за образования выбросов CO и SO<sub>2</sub>. Как правило, основные меры не могут гарантировать достижение уровня выбросов менее 500 мг/Нм<sup>3</sup> при 10% O<sub>2</sub> (среднесуточное значение).

Первичные меры эффективны, однако для достижения значительного сокращения выбросов NO<sub>x</sub> необходимо использовать вторичные меры, такие как селективное некаталитическое восстановление (СНКВ) или селективное каталитическое восстановление (СКВ).



## СНКВ

Среди вторичных мер основным методом, используемым на цементных заводах, является СНКВ [12]. При СНКВ достигается коэффициент преобразования порядка 60–80 % при стехиометрическом соотношении 1,2–1,8 [3]. Эффективность 30–50 % достигается при стехиометрии 0,5–0,9. Эффективность процесса в значительной степени зависит от температурного окна, и подача аммиака или мочевины должна происходить в оптимальной температурной зоне, как это показано на следующей схеме. За пределами диапазона оптимальных температур увеличивается проскок аммиака или возрастают выбросы NO. Опыт показывает, что для значений NOx <350 мг/м<sup>3</sup> выбросы NH<sub>3</sub> от несгоревшего восстановителя существенно увеличиваются (даже если температура попадает в оптимальный диапазон) [3]. Для низких значений NOx (<200 мг/м<sup>3</sup>) процесс СНКВ подходит лишь частично, например, в печах с кальцинатором и при низких исходных выбросах NOx. В таких случаях значительно увеличивается проскок NH<sub>3</sub>, нарушая положительный азотный баланс.

При использовании СНКВ НДТ заключается в достижении эффективного снижения NOx при минимальном проскоке аммиака с использованием следующих методов [3]:

- Применение соответствующей и достаточной эффективности снижения NOx в сочетании со стабильным процессом эксплуатации.
- Обеспечение хорошего стехиометрического распределения аммиака для достижения максимальной эффективности снижения NOx и уменьшения проскока NH<sub>3</sub>.
- Минимизация выбросов NH<sub>3</sub> с учётом корреляции между эффективностью снижения NOx и проскоком NH<sub>3</sub>

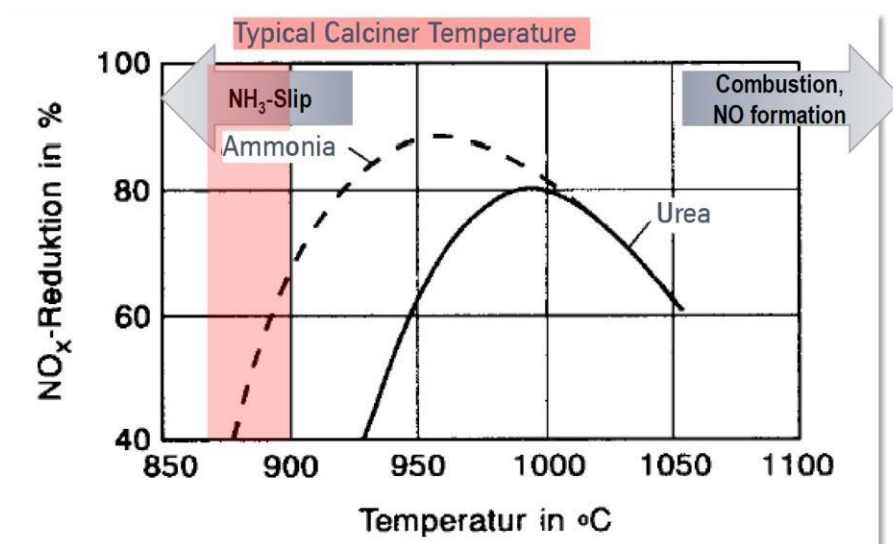


Рисунок 1: Эффективность СНКВ в зависимости от температуры [11]

## СКВ

Значительное снижение выбросов NOx (> 90 %) может быть достигнуто с использованием СКВ, при этом диапазон выбросов NOx составляет 100–200 мг/Нм<sup>3</sup>, а стехиометрическое соотношение ниже (около 1) [10]. На момент разработки руководящего документа UNECE (2010–2012 гг.) [8] указывалось, что СКВ всё ещё требует соответствующих катализаторов и развития процессов в цементной промышленности. Это было подтверждено в выводах по НДТ для производства цемента

за 2013 год [3]. Однако с 2010 года произошли изменения: в Европе в 2016 году СКВ была установлена на 8 заводах. Согласно источнику [20], с учётом общего азотного баланса (включая NOx и NH<sub>3</sub>), технология СКВ в большинстве случаев является лучшим вариантом, хотя современные печи с кальцинатором могут быть исключением.

Существуют две системы СКВ: с низким содержанием пыли — между установкой обеспыливания и трубой; с высоким содержанием пыли — между предварительным нагревателем и установкой обеспыливания. Системы с низким содержанием пыли требуют подогрева отходящих газов после обеспыливания [3].

Чаще всего применяются катализаторы на основе TiO<sub>2</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при температуре ~300°C, где раствор аммиака предварительно испаряется. Два или более слоя катализаторных блоков размещаются после выхода из предварительного нагревателя (высокопыльная конфигурация) или как система на конечном участке после процессного фильтра (низкопыльная конфигурация). Катализатор должен адаптироваться к специфике отходящих газов в каждом конкретном случае [20]. Срок службы катализаторов составляет 5–6 лет [3], в зависимости от конфигурации системы. Катализаторы в высокопыльных системах, как правило, заменяются быстрее, чем в низкопыльных. Чтобы предотвратить дезактивацию катализатора, концентрации SO<sub>2</sub> должны быть минимальными [12].

На данный момент несколько заводов оснащены СКВ, в частности в Германии, где национальный норматив ELV составляет 200 мг/Нм<sup>3</sup> при 10 % O<sub>2</sub> [11].

Следующий рисунок демонстрирует динамику оснащения заводов технологиями СКВ, СНКВ или другими методами в Европе ([12] и информация CEMBUREAU).

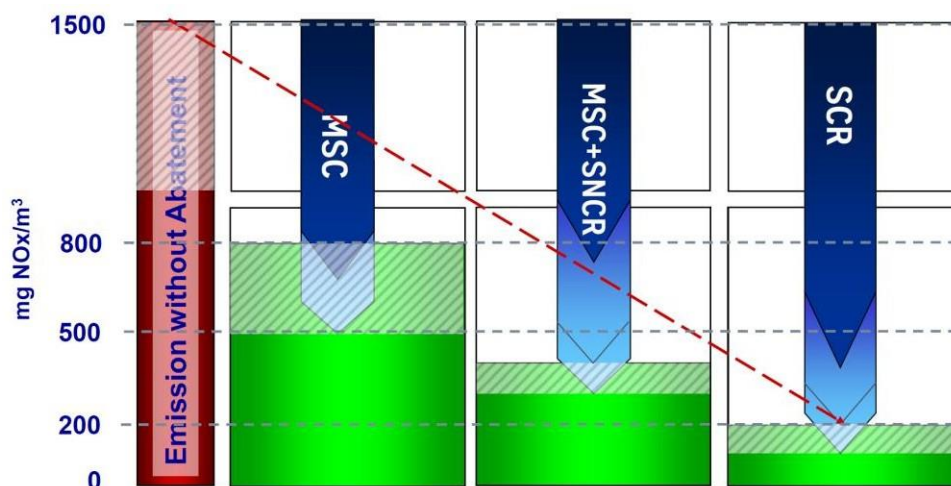


**Рисунок 2: Динамика оснащения заводов технологиями СНКВ и другими методами в Европе ([12] и информация CEMBUREAU)**

### Достижимые выбросы

Следующий рисунок демонстрирует возможности различных первичных (MSC: многоступенчатое сжигание) и вторичных техник (СНКВ и СКВ) для снижения выбросов NOx [11].





**Рисунок 3: Возможности различных техник по снижению выбросов NO<sub>x</sub> на цементных заводах [11] (MSC: многоступенчатое сжигание).**

Инвестиционные затраты на СКВ по-прежнему значительно выше, чем на СНКВ.

В цементной промышленности НДТ по снижению выбросов NO<sub>x</sub> включают первичные меры, комбинированные с многоступенчатым сжиганием, и СНКВ или СКВ. При использовании этих техник достижимы значения выбросов в диапазоне 200–500 мг/Нм<sup>3</sup> (суточные значения выбросов) [8]. Выводы по НДТ [3] предоставляют более детальную информацию о достижимых уровнях в зависимости от типов печей. Однако в заключениях по НДТ [24] имеется примечание, что обмен информацией завершился в 2008 году. Информация о разработках после этой даты не включена в выводы по НДТ и не использовалась при рассмотрении НДТ.

**Таблица 5: Соответствующие НДТ уровни выбросов NO<sub>x</sub>, из отходящих/отходящих газов в процессах обжига в печи и/или предварительного нагрева/предварительного обжига в цементной промышленности [24]**

Тип печи	Единица измерения	ВАТ-AEL (среднесуточное значение)
Печи с циклонным теплообменником	мг/Нм <sup>3</sup>	< 200 – 450 <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup>
Печи системы Леполь и длинные вращающиеся печи	мг/Нм <sup>3</sup>	400 – 800 <sup>(3)</sup>

(1) Верхний уровень диапазона ВАТ-AEL составляет 500 мг/Нм<sup>3</sup>, если исходный уровень NO<sub>x</sub> после основных технических решений составляет > 1000 мг/Нм<sup>3</sup>.

(2) На способность оставаться в пределах диапазона могут влиять конструкция существующей печной системы, свойства топливной смеси, включая горючесть отходов и сырья (например, специальный цемент или белый цементный клинкер). Уровни ниже 350 мг/Нм<sup>3</sup> достигаются в печах с благоприятными условиями при использовании СНКВ. В 2008 году ниже значение 200 мг/Нм<sup>3</sup> было зарегистрировано как среднесуточное значение для трех заводов (с использованием легкогорючей смеси) с применением СНКВ.

(3) В зависимости от начальных уровней и проскока NH<sub>3</sub>.

Содержание выбросов NH<sub>3</sub> должно контролироваться за счет максимально эффективного впрыска мочевины или аммиака при использовании техники СНКВ. В случае СКВ уровень выбросов аммиака ниже. Подробнее о технике СНКВ см. в предыдущих комментариях.

**Таблица 6: Соответствующие НДТ уровни выбросов для проскока NH<sub>3</sub> в отходящих газах при применении СНКВ [24]**

Параметр	Единица измерения	ВАТ-АЕЛ (среднесуточное значение)
Проскок NH <sub>3</sub>	мг/Нм <sup>3</sup>	<30 – 50 <sup>(1)</sup>
<sup>(1)</sup> Проскок аммиака зависит от начального уровня NO <sub>x</sub> и от эффективности мер по снижению выбросов NO <sub>x</sub> . Для печей системы Леполь и длинных вращающихся печей уровень может быть еще выше.		

В Германии [20] предельное значение выбросов (проскок NH<sub>3</sub> + выбросы, связанные с сырьем) составляет 30 мг/м<sup>3</sup>. Возможны исключения для более высоких предельных значений, если эти значения обусловлены составом сырья.

### *Пыль и тяжёлые металлы*

Для производства цемента с точки зрения выбросов пыли и тяжёлых металлов требуется применение следующих общих первичных мер [7]:

- Стабильный процесс работы печи. Регулярные мониторинг и измерение параметров процесса и выбросов являются важными.
- Тщательный подбор и контроль веществ, поступающих в печь. Следует отдавать предпочтение сырью и топливу с низким содержанием серы, азота, хлора, металлов (особенно ртути) и летучих органических соединений.
- Использование системы управления качеством. Это необходимо для контроля характеристик отходов, используемых как сырьё и/или топливо, чтобы обеспечить их стабильное качество, а также соответствие физическим и химическим критериям. Следует контролировать такие параметры отходов.
- Применение эффективных мер/техник для удаления пыли, таких как рукавные фильтры (РФ) (с несколькими секциями и датчиками разрыва мешков) или электростатические фильтры (ESP) (с системой быстрого измерения и управления для минимизации количества остановок из-за оксида углерода).
- Минимизация или сокращение выбросов пыли от диффузных источников с помощью следующих мер и техник:
  - (i) Минимизация/предотвращение выбросов пыли от диффузных источников.
  - (ii) Методы измерения при проведении пыльных работ.
  - (iii) Меры/техники для зон хранения сыпучих материалов.

Для снижения прямых выбросов пыли из дробилок, мельниц и сушилок в основном используются рукавные фильтры, тогда как отходящие газы из печей и охладителей клинкера контролируются с помощью ESP или РФ.

Выбросы пыли из процессов обжига в печи, охлаждения и помола можно снизить до концентраций <10 мг/Нм<sup>3</sup> – 20 мг/Нм<sup>3</sup> (среднесуточное значение, 10% O<sub>2</sub>), из других процессов — до концентраций <10 мг/Нм<sup>3</sup> [7]. Заключение ЕС по НДТ для производства

цемента [24] предоставляют аналогичные данные для печей, только указывая, что при использовании рукавных фильтров (РФ) или новых и модернизированных электростатических фильтров (ESP) достигается нижний предел выбросов.

Руководящий документ UNEP предоставляет следующую таблицу. Выбросы Cd и Pb могут быть сокращены более чем на 95%, а выбросы Hg — более чем на 95% при использовании адсорбции активированным углём. Документ UNEP указывает на более низкую эффективность в диапазоне от 70 до 90% [21]. Другим способом минимизации выбросов ртути является снижение температуры отходящих газов. При высоких концентрациях летучих металлов (особенно ртути) адсорбция на активированном угле является возможным вариантом. Также можно добиться увеличения эффективности ESP при дополнительном использовании галогенидов (особенно бромидов).

**Таблица 7: Предельные значения выбросов пыли и тяжёлых металлов согласно [7]**

<i>Emission source</i>	<i>Control measure(s)</i>	<i>Reduction efficiency (%)</i>	<i>Reported emissions (mg/Nm<sup>3</sup>)</i>
Direct emissions from kiln firing, cooling and milling processes	Primary measures plus FF or ESP	Cd, Pb: > 95	Dust: < 10–20
Direct emissions from dusty operations <sup>a</sup>	Primary measures plus FF or ESP		Dust: < 10
Direct emissions from rotary kilns	Activated carbon adsorption	Hg: > 95	Hg: 0.001–0.003

<sup>a</sup> Dusty operations: e.g., crushing of raw material, conveyers and elevators, storage of fuels and raw material.

Согласно Заключениям ЕС по НДТ [24], соответствующие НДТ уровни выбросов металлов, для процессов сжигания отходящих газов приведены ниже:

**Таблица 8: Соответствующие НДТ уровни выбросов металлов из отходящих газов при обжиге в печи**

Металлы	Единица измерения	ВАТ-АЕЛ (среднее значение за период отбора проб (точные измерения, не менее получаса))
Hg	мг/Нм <sup>3</sup>	<0,05 <sup>(2)</sup>
∑ (Cd, Tl)	мг/Нм <sup>3</sup>	<0,05 <sup>(1)</sup>
∑ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	мг/Нм <sup>3</sup>	<0,5 <sup>(1)</sup>

(1) Информация о низких уровнях связана с качеством сырья и топлива.  
(2) Информация о низких уровнях связана с качеством качества сырья и топлива. Значения выше 0,03 мг/Нм<sup>3</sup> требуют дальнейшего изучения. Значения, близкие к 0,05 мг/Нм<sup>3</sup>, требуют рассмотрения возможности применения дополнительных техник (например, снижение температуры отходящих газов, использование активированного угля).

## SO<sub>2</sub>

Выбросы SO<sub>2</sub> цементных заводов зависят от общего содержания соединений серы и типа используемого процесса, что в основном определяется содержанием летучей серы в сырье и, возможно, в топливе. Первый шаг в отношении контроля SO<sub>2</sub> заключается в

применении методов оптимизации основных процессов, таких как оптимизация процесса обжига клинкера, включая стабилизацию работы печи, равномерное распределение горячего сырья в подъемной трубе печи и предотвращение восстановительных условий в процессе обжига, а также выбор сырья и топлива [3].

Однако в случаях, когда исходные уровни выбросов SO<sub>2</sub> достаточно высоки, необходимо применять различные системы очистки отходящих газов.

- Добавление абсорбентов, таких как гашеная известь (Ca(OH)<sub>2</sub>), негашеная известь (CaO) или активированный летучий пепел с высоким содержанием CaO, может осуществляться как в сырье, так и в дымовые газы для поглощения части SO<sub>2</sub>.
- В отходящих газах этот процесс может выполняться в сухой или влажной форме. Рекомендуется использование абсорбентов на основе Ca(OH)<sub>2</sub> с высокой удельной поверхностью и высокой пористостью. Низкая реакционная способность таких абсорбентов предполагает использование мольного соотношения Ca/S от 3 до 6 в случае сухого процесса.
- В отдельных случаях, когда выбросы не могут быть снижены другими методами, среди НДТ для сероочистки может использоваться мокрая очистка. В техниках мокрой очистки дымовые газы сначала очищаются от пыли, а затем обрабатываются раствором щелочных соединений. SO<sub>2</sub> вступает в реакцию с этим абсорбентом, образуя различные побочные продукты, которые могут быть переработаны в серную кислоту, серу, гипс или реагенты для очистки. Можно ожидать снижения выбросов SO<sub>2</sub> более чем на 90%.

Соответствующие НДТ уровни выбросов, могут быть достигнуты за счет добавления абсорбентов или применения мокрых скрубберов.

Что касается добавления абсорбентов, следует учитывать, что стоимость абсорбентов увеличивает операционные расходы с ростом концентрации SO<sub>2</sub>, поэтому эта мера может стать неэффективной с экономической точки зрения для исходных уровней выбросов SO<sub>2</sub> выше 1 200 мг/м<sup>3</sup>.

На цементных заводах с использованием адаптированных техник могут быть достигнуты концентрации в диапазоне 50–400 мг/Нм<sup>3</sup>. В следующей таблице представлено обобщение соответствующих НДТ уровней выбросов SO<sub>2</sub>, при производстве цемента согласно [24].

**Таблица 9: Соответствующие НДТ уровни выбросов SO<sub>2</sub>[24]**

Параметр	Единица измерения	ВАТ-AEL <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> (среднесуточное значение)
SO <sub>x</sub> в виде SO <sub>2</sub>	мг/Нм <sup>3</sup>	<50 – 400
<p>(1) Диапазон учитывает содержание серы в сырье.</p> <p>(2) При производстве белого цемента и специального цементного клинкера способность клинкера удерживать серу в топливе может быть значительно ниже, что приведет к более высоким выбросам SO<sub>x</sub></p>		

## Диоксины

Ограничение выбросов диоксинов осуществляется посредством ряда передовых методов (НДТ), таких как [3]:

- Тщательный выбор и контроль сырьевых материалов для печей, включая хлор,

медь и летучие органические соединения.

- Тщательный выбор и контроль используемого топлива, включая содержание хлора и меди.
- Ограничение или предотвращение использования отходов, содержащих хлорорганические материалы.
- Избегание подачи топлива с высоким содержанием галогенов (например, хлора) для вторичного сжигания.
- Прекращение совместного сжигания отходов во время операций, таких как запуск и/или остановка оборудования.

Использование техники СКВ также способствует снижению выбросов ПХДД/Ф (полихлорированные дибензо-п-диоксины/дибензофураны) [22].

Выбросы ПХДД/Ф из отходящих газов при обжиге в печах могут быть снижены до уровня  $<0,05 - 0,1$  нг ПХДД/Ф I-TEQ/Nm<sup>3</sup>, в среднем за период отбора проб (6–8 часов) [24].

## 5. Определение эталонной установки/процесса и затрат

В соответствии с методологией, разработанной бывшей экспертной группой ГЭ ТЭВ, затраты предварительно определяются с использованием максимально возможного подхода "снизу-вверх". Затраты рассчитываются с учетом одной или нескольких эталонных установок, которые считаются репрезентативными для данной деятельности. Для цементной промышленности рабочая группа, созданная в 2003 году [4], предложила использовать одну эталонную установку для всего сектора цемента, не учитывая различия процессов (влажный, сухой и т.д.).

Документ BREF (Справочный документ по НДТ) для производства цемента, извести и оксида магния (2013) указывает, что "типичный размер печи составляет около 3000 тонн клинкера в день" [3].

Срок службы печи составляет около 35 лет, а фактор загрузки завода – 320 дней в году [4].

**Таблица 10: Размер эталонной установки**

Код эталона	Процесс производства цемента	Производительность [т клинкера/сут]	Срок службы [лет]	Фактор загрузки завода [ч/год]
01	Средняя установка	3 000	35	7 680

Примечание: Средний коэффициент преобразования ( $F_{conv}$ ) между концентрациями загрязнителей (в мг/Nm<sup>3</sup>) и удельными массовыми потоками загрязнителей (фактор выбросов, в кг на тонну произведенного клинкера) может быть рассчитан с использованием удельного объема отходящих газов на тонну клинкера:

$S_{GasvolSpec}$  – это удельный объем отходящих газов, образующихся при производстве одной тонны клинкера:

2 300 Nm<sup>3</sup>/т клинкера [3]

$$F_{\text{conv}} = S_{\text{GasvolSpec}} 10^{-6}$$

Концентрация выбросов загрязнителя (в мг/Nm<sup>3</sup>) × F<sub>conv</sub> = Удельный массовый поток выбросов загрязнителя (в кг/т произведенного клинкера).

Принципы оценки затрат приведены в Приложении 4.

В соответствии с детализированной методологией, разработанной техническим секретариатом ЦГ ТЭВ (ЦГ ТЭВ) в 2005 и 2011 годах, была подготовлена анкета для сбора данных о капитальных затратах и эксплуатационных расходах. Информация была получена от SEMBUREAU [23].

## 6. Резюме затрат на снижение выбросов

Для актуализации данных о затратах технический секретариат разработал анкету для сбора обновленных данных о капитальных вложениях и эксплуатационных расходах. Информация была получена от SEMBUREAU [23].

Следующие таблицы обобщают затраты на техники снижения выбросов пыли, NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub>. Подробности и допущения представлены в приложениях I–III для каждого загрязняющего вещества.

### Пыль

Следующая таблица представляет затраты на снижение выбросов пыли с использованием рукавного фильтра (РФ) при достижении соответствующих НДТ уровней выбросов (ВАТ АЕЛ) в 5 мг/Нм<sup>3</sup>. Среднесуточная концентрация пыли на входе до очистки составляет 56 мг/Нм<sup>3</sup> или около 130 г/т клинкера, как было принято в 2003 году [4].

**Таблица 11: Капитальные и эксплуатационные затраты на снижение выбросов пыли с использованием РФ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день [23]**

Параметры	Единицы измерения	Диапазон значений
Среднесуточная концентрация пыли до очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	56
Среднесуточная концентрация пыли на выходе	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	5
Инвестиции (Сарех)	тыс. евро	4 000 - 10 000
Общие эксплуатационные расходы (Орех)	евро/т клинкера	0,3
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера	4,0

При сроке службы 20 лет и норме ежегодной амортизации 4%, коэффициенты рентабельности затрат варьируются от 5 200 €/т предотвращенной пыли (ОВЧ) до 9 100 €/т. Годовые затраты на тонну клинкера составляют от 0,45 до 1,25 €/ клинкера, как представлено в следующей таблице.

**Таблица 12: Общие годовые затраты и коэффициент рентабельности для РФ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день**

Параметры	Единицы измерения	Нижняя граница	Верхняя граница
Инвестиции	тыс. евро	4 000	10 000
Ежегодные амортизационные затраты	евро/год	294 327	735 818



Ежегодные эксплуатационные затраты	евро/год	288 000	288 000
Общие годовые затраты	евро/год	582 327	1 023 818
Общие годовые затраты	евро/т клинкера	0,61	1,07
Общие годовые затраты	евро/т предотвращенной пыли	5 171	9 092

## NOx

В следующих таблицах представлены затраты на снижение выбросов NOx для различных соответствующих НДТ уровней выбросов (ВАТ АЕЛ), которые достигаются с помощью СНКВ или СКВ. Для расчетов были использованы следующие среднесуточные значения: 800 мг/Нм<sup>3</sup> и 400 мг/Нм<sup>3</sup> для СНКВ и 200 мг/Нм<sup>3</sup> для СКВ. Среднесуточная концентрация NOx на входе принята равной 1200 мг/Нм<sup>3</sup>.

### СНКВ

**Таблица 13: Затраты на снижение выбросов NOx с помощью СНКВ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день [23]**

Параметры	Единицы измерения	Диапазон значений
Среднесуточная концентрация NOx до очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	1 200
Среднесуточная концентрация NOx на выходе	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	800 - 400
Инвестиции (Сарех)	тыс. евро	1 600 – 2 000
Общие эксплуатационные расходы (Орех)	евро/т клинкера	0,3 - 1,0
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера	0,1-1,0
Примечание: Уровень проскока NH <sub>3</sub> следует учитывать при сравнении техник снижения выбросов NOx.		

При сроке службы 20 лет и норме ежегодной амортизации 4%, коэффициенты рентабельности затрат варьируются от 460 €/т предотвращенного NOx до 1 250 €/т. Годовые затраты на тонну клинкера составляют от 0,4 до 1,2 €/т клинкера, как представлено в следующей таблице.

**Таблица 14: Общие годовые затраты и коэффициент рентабельности для СНКВ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день**

Параметры	Единицы измерения	Нижняя граница	Верхняя граница
Выбросы до применения СНКВ	т/год	2 650	2 650
Выбросы после применения СНКВ	т/год	1 766	883
Предотвращенные выбросы	т/год	883	1 766
Инвестиции	тыс. евро	1 600	2 000
Ежегодные амортизационные затраты	евро/год	117 731	147 164
Ежегодные эксплуатационные затраты	евро/год	288 000	960 000
Общие годовые затраты	евро/год	405 731	1 107 164
Общие годовые затраты	евро/т клинкера	0,4	1,2
Общие годовые затраты	евро/т предотвращенного NOx	459	1 254

## СКВ

**Таблица 15: Затраты на снижение выбросов NOx с помощью СКВ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день [23]**

Параметры	Единицы измерения	Диапазон значений
Среднесуточная концентрация NOx до очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	1 200
Среднесуточная концентрация NOx на выходе	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	200
Инвестиции (Сарех)	тыс. евро	5 000 -15 000
Общие эксплуатационные расходы (Орех)	евро/т клинкера	0,8 – 1,4 <sup>5</sup>
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера	3-7

При сроке службы 20 лет и норме ежегодной амортизации 4% коэффициенты рентабельности затрат варьируются от 510 €/т предотвращенного NOx до 1 110 €/т. Годовые затраты на тонну клинкера составляют от 1,2 до 2,5 €/т клинкера. Эти затраты выше, чем для СНКВ.

**Таблица 16: Общие годовые затраты и коэффициент рентабельности для СКВ на заводе мощностью 3000 т клинкера/день**

Параметры	Единицы измерения	Нижняя граница	Верхняя граница
Выбросы до применения СКВ	т/год	2 650	2 650
Выбросы после применения СКВ	т/год	442	442
Предотвращаемые выбросы	т/год	2 208	2 208
Инвестиции	тыс. евро	5 000	15 000
Ежегодные амортизационные затраты	евро/год	367 909	1 103 726
Ежегодные эксплуатационные затраты	евро/год	768 000	1 344 000
Общие годовые затраты	евро/год	1 135 909	2 447 726
Общие годовые затраты	евро/т клинкера	1,18	2,55
Общие годовые затраты	евро/т предотвращенного NOx	514	1 109

Результаты, полученные в данном исследовании, могут быть сопоставлены с немногочисленными доступными данными в литературе. Исследование ECOFYS «Система торговли выбросами NOx и SO<sub>2</sub> в Европе» [9] предоставляет некоторые диапазоны значений. Доступные данные следующие и также упоминаются в источнике [12].

Полученные результаты находятся в том же порядке значений и в пределах диапазона оценок затрат, сделанных ECOFYS [9], однако максимальные значения диапазонов ECOFYS не были достигнуты.



**Таблица 17: Основные результаты по сокращению выбросов NO<sub>x</sub> в цементном секторе ЕС согласно ECOFYS [9]**

Abatement cost at various emission levels	NO <sub>x</sub> [€/ton clinker]	SO <sub>2</sub> [€/ton clinker]
Current emission level	0,3 (0,1 - 1,7)	0,8 (0,2 - 4,7)
Upper BAT emission level	0,7 (0,1 - 2,9)	2,1 (0,2 - 6,8)
Lower BAT emission level	0,9 (0,2 - 3,7)	3,2 (1,4 - 10,7)

Цифры в скобках указывают на диапазон затрат на уровне отдельных предприятий (NO<sub>x</sub>: верхний предел 450 или 800 мг/нм<sup>3</sup> в зависимости от процессов и нижний предел <200 или 400 мг/нм<sup>3</sup>. Для SO<sub>2</sub> верхний предел 400 мг/нм<sup>3</sup>, нижний предел <50 мг/нм<sup>3</sup>) [9].

## SO<sub>2</sub>

Следующая таблица представляет затраты на снижение выбросов SO<sub>2</sub> с использованием различных техник (добавление абсорбента, мокрое сероочистка отходящих газов) и предельные уровни выбросов (50–400 мг/нм<sup>3</sup>), которые необходимо достичь.

### Добавление абсорбента

**Таблица 18: Затраты на снижение выбросов SO<sub>2</sub> за счет добавления абсорбента на заводе мощностью 3000 т клинкера в день**

Параметры	Единицы измерения	Диапазон значений
Среднесуточная концентрация SO <sub>2</sub> до очистки	мг/нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	600 - 1 000
Среднесуточная концентрация SO <sub>2</sub> после очистки	мг/нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	400
Инвестиции (Capex)	тыс. евро	200 - 750
Общие операционные затраты (Opex)	Евро/т клинкера	0,3 - 0,7
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера	0,1 - 0,3

Срок службы 20 лет и ставка ежегодной амортизации 4% дают коэффициенты эффективности затрат в диапазоне от 690 евро/т SO<sub>2</sub> до 1 650 евро/т SO<sub>2</sub>, как показано в следующей таблице. Годовые затраты на одну тонну клинкера составляют от 0,3 до 0,8 евро/т клинкера.

**Таблица 19: Общие годовые затраты и коэффициент эффективности затрат для добавления абсорбента на заводе мощностью 3000 т клинкера в день**

Параметры	Единица измерения	Нижняя граница	Верхняя граница
Выбросы до добавления абсорбента	т/год	1 325	2 208
Выбросы после добавления абсорбента	т/год	883	883
Предотвращаемые выбросы	т/год	442	1 325
Инвестиции	тыс. евро	200	750
Ежегодные амортизационные затраты	Евро/год	4 716	55 186
Операционные годовые затраты	Евро/год	288 000	672 000
Общие годовые затраты	Евро/год	302 716	727 186
Общие годовые затраты	Евро/т клинкера	0,3	0,8
Общие годовые затраты	Евро/т SO <sub>2</sub>	685	1 647

Мокрая сероочистка отходящих газов (WFGD)

**Таблица 20: Затраты на сокращение выбросов SO<sub>2</sub> с помощью WFGD на заводе мощностью 3000 т клинкера в день**

Параметры	Единицы измерения	Диапазон значений
Среднесуточная концентрация SO <sub>2</sub> до очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	700 – 1 300
Среднесуточная концентрация SO <sub>2</sub> после очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	50 - 400
Инвестиции (Сарех)	тыс. евро	10 000 - 26 000
Общие операционные затраты (Орех)	Евро/т клинкера	0,4 - 1,4
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера	8 - 10

При сроке службы 20 лет и норме амортизации 4%, коэффициенты экономической эффективности варьируются от 1700 €/т SO<sub>2</sub> до 4920 €/т SO<sub>2</sub>, как показано в следующей таблице. Самые высокие затраты наблюдаются при достижении самых низких предельных уровней выбросов (ELV) и при более высоких исходных концентрациях. Годовые затраты на тонну клинкера составляют от 1,2 до 3,4 €/т клинкера. Эти затраты выше, чем для метода с добавлением адсорбента.

**Таблица 21: Общие годовые затраты и коэффициент экономической эффективности для мокрой сероочистки отходящих газов (WFGD) на заводе мощностью 3000 т клинкера в день**

Параметры	Единица измерения	Нижний предел	Верхний предел
Выбросы до добавления абсорбента	т/год	1 546	2 870
Выбросы после добавления абсорбента	т/год	883	110
Предотвращаемые выбросов	т/год	662	2 760
Инвестиции	тыс. евро	10 000	26 000
Ежегодные амортизированные капитальные затраты	евро/год	735 818	1 913 126
Ежегодные операционные затраты	евро/год	384 000	1 344 000
Общие годовые затраты	евро/год	1 119 818	3 257 126
Общие годовые затраты	евро/т клинкера	1,2	3,4
Общие годовые затраты	евро/т SO <sub>2</sub>	1 691	4 917

Полученные результаты можно сравнить с ограниченными данными, доступными в литературе. Исследование ECOFYS «Система торговли выбросами NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub> в Европе» [9] предоставляет некоторые диапазоны значений. Полученные результаты находятся в том же диапазоне величин, но верхний предел значений затрат, указанных в исследовании ECOFYS, не был достигнут в данном исследовании (таблица 16).

## 7. Приложение 1 – Гипотезы, использованные для оценки затрат на снижение выбросов пыли

Предварительные данные для оценки затрат на системы электрофильтров (ESP) и рукавных фильтров (РФ) были разработаны техническим секретариатом ЦГ ТЭВ на основе более ранних документов и обновлений 2005 и 2011 годов. Предварительный документ, подготовленный в мае 2019 года, был направлен нескольким экспертам ведомства по охране окружающей среды Германии UBA [22] и SEMBUREAU [23]. Обновления данных о затратах были предоставлены SEMBUREAU [23].

Характеристики эталонного завода:

<b>Эталонная установка</b>	т цемента/день	3 750
80%	т клинкера/день	3 000
Срок службы завода	лет	35
Часы работы в год	ч/год	7 680
Срок службы оборудования	лет	20
Объем отходящих газов	Нм <sup>3</sup> /т клинкера	2 300

Следующая таблица сравнивает затраты, определенные техническим секретариатом ЦГ ТЭВ на основе предыдущих документов, с обновленными затратами, предоставленными SEMBUREAU [23].

Рукавный фильтр	Единица	Параметры и предварительная оценка затрат (март 2019)	Параметры и обновленные данные о затратах [23]
Среднесуточная концентрация пыли до фильтра	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	56	56
Среднесуточная концентрация пыли после фильтра	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	5	5
Инвестиции (Сарех)	тыс. евро	4 000 – 8 000	4 000 – 10 000
Общие эксплуатационные затраты (Орех)	евро/т клинкера	0,5	0,3
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера		4,0

Рассчитанные затраты:

	Единица	Нижний предел	Верхний предел
<b>Выбросы пыли</b>			
До РФ	т/год	124	124
После РФ	т/год	11	11
Предотвращенные выбросы	т/год	113	113
<b>Затраты</b>			
Инвестиции	тыс. евро	4 000	10 000
Процентные ставки	4%		
Ежегодная амортизация	%/у	7,36	7,36
Ежегодные амортизированные	евро/год	294 327	735 818

капитальные затраты			
Ежегодные операционные затраты	евро/год	288 000	288 000
Общие годовые затраты	евро/год	582 327	1 023 818
Общие годовые затраты	евро/т клинкера	0,61	1,07
Общие годовые затраты	евро/т устраненной пыли	5 171	9 092

## 8. Приложение 2 – Гипотезы, использованные для оценки затрат на снижение выбросов NOx

Предварительные данные для оценки затрат на СНКВ и СКВ были разработаны командой ЦГ ТЭВ на основе более ранних документов ЦГ ТЭВ и обновлений 2005 и 2011 годов. Предварительный документ, подготовленный в мае 2019 года, был направлен нескольким экспертам ведомства по охране окружающей среды Германии UBA [22] и SEMBUREAU [23]. Обновленные данные о затратах были предоставлены SEMBUREAU [23].

Характеристики эталонного завода:

<b>Эталонная установка</b>	т цемента/день	3 750
80%	т клинкера/день	3 000
Срок службы завода	лет	35
Часы работы в год	ч/год	7 680
Срок службы оборудования	лет	20
Объем отходящих газов	Нм <sup>3</sup> /т клинкера	2 300

### СНКВ

Следующая таблица сравнивает затраты, определенные техническим секретариатом ЦГ ТЭВ на основе предыдущих документов, с обновленными данными, предоставленными SEMBUREAU [23].

СНКВ	Единица	Параметры и предварительная оценка затрат (март 2019)	Параметры и обновленные данные о затратах [23]
Среднесуточная концентрация NOx до очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	1200	1200
Среднесуточная концентрация NOx после очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	800-400	800-400
Инвестиции (Сарех)	тыс. евро	1 600 – 2 000	1 600 – 2 000
Общие эксплуатационные затраты (Орех)	евро/т клинкера	0,18-0,77	0,3-1,0
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера		0,1-1,0

Рассчитанные затраты:

	Единица	Нижний предел	Верхний предел
<b>Выбросы NOx</b>			
До СНКВ	т/год	2650	2650
После СНКВ	т/год	1766	883
Предотвращаемые выбросы	т/год	883	1766
<b>Затраты</b>			
Инвестиции	тыс. евро	1 600	2 000
Процентные ставки	4%		
Ежегодная амортизация	%/ год	7,36	7,36
Ежегодные амортизированные капитальные затраты	евро/год	117 731	147 164
Ежегодные операционные	евро/год	288 000	960 000

затраты			
Общие годовые затраты	евро/год	405 731	1 107 164
Общие годовые затраты	евро/т клинкера	0.42	1.15
Общие годовые затраты	евро/т NOx устраненного	459	1 254

## **СКВ**

Следующая таблица сравнивает затраты, определенные техническим секретариатом ЦГ ТЭВ на основе предыдущих документов, с обновленными данными, предоставленными СЕМBUREAU [23].

СКВ	Единица	Параметры и предварительная оценка затрат (март 2019)	Параметры и обновленные данные о затратах [23]
Среднесуточная концентрация NOx до очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	1 200	1 200
Среднесуточная концентрация NOx после очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	200	200
Инвестиции (Сарех)	тыс. евро	3 200-4 500	5 000-15 000
Общие эксплуатационные затраты (Орех)	евро/т клинкера	0,7	0,8-1,4 <sup>6</sup>
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера		3-7

Рассчитанные затраты:

	Единица	Нижний предел	Верхний предел
<b>Выбросы NOx</b>			
До СКВ	т/год	2 650	2 650
После СКВ	т/год	442	442
Предотвращаемые выбросы	т/год	2 208	2 208
<b>Затраты</b>			
Инвестиции	тыс. евро	5 000	15 000
Процентные ставки	4%		
Ежегодная амортизация	%/ год	7,36	7,36
Ежегодные амортизированные капитальные затраты	евро/год	367 909	1 103 726
Ежегодные операционные затраты	евро/год	768 000	1 344 000
Общие годовые затраты	евро/год	1 135 909	2 447 726
Общие годовые затраты	евро/т клинкера	1,18	2,55
Общие годовые затраты	евро/т NOx устраненного	514	1 109

ЦГ ТЭВ – Цемент – декабрь 2020

<sup>6</sup> Нижняя граница диапазона для систем с низким содержанием пыли, верхняя граница для систем с высоким содержанием пыли при ΔNOx 1.000 мг/м<sup>3</sup> (STP)

## 9. Приложение 3 - Метод и гипотезы, использованные для оценки затрат на техники снижения выбросов SO<sub>2</sub>

Предварительные данные для оценки затрат на добавление абсорбента и мокрую установку мокрой сероочистки отходящих газов (WFGD) были подготовлены техническим секретариатом ЦГ ТЭВ на основе более ранних документов ЦГ ТЭВ и их обновлений, проведённых в 2005 и 2011 годах. Предварительный документ, разработанный в мае 2019 года, был направлен на рассмотрение нескольким экспертам ведомства по охране окружающей среды Германии UBA [22] и CEMBUREAU [23]. Обновлённые данные о затратах были предоставлены CEMBUREAU [23].

Характеристики эталонной установки:

<b>Эталонная установка</b>	т цемента/день	3 750
80%	т клинкера/день	3 000
Срок службы завода	лет	35
Часы работы в год	ч/год	7 680
Срок службы оборудования	лет	20
Объем отходящих газов	Нм <sup>3</sup> /т клинкера	2 300

### Добавление абсорбента

Следующая таблица сравнивает затраты, рассчитанные техническим секретариатом ЦГ ТЭВ на основе предыдущих документов, с обновлёнными данными, предоставленными CEMBUREAU [23]

Добавление абсорбента	Единица	Параметры и предварительная оценка затрат (март 2019)	Параметры и обновленные данные о затратах [23]
Среднесуточные концентрации SO <sub>2</sub> до очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	1000 - 1600	600 - 1000
Среднесуточные концентрации SO <sub>2</sub> после очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	400	400
Инвестиции (Сарех)	тыс. евро	515	200 - 750
Общие операционные затраты (Орех)	евро/т клинкера	0,4 - 1,3	0,3 - 0,7
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера		0,1 - 0,3

Рассчитанные затраты:

	Единица	Нижний диапазон	Верхний диапазон
<b>Выбросы SO<sub>2</sub></b>			
До добавления абсорбента	т/год	1 325	2 208
После добавления абсорбента	т/год	883	883
Предотвращаемые выбросы	т/год	442	1 325
<b>Затраты</b>			
Инвестиции	тыс. евро	200	750
Процентная ставка	4%		

Ежегодный коэффициент амортизации	%/год	7,36	7,36
Ежегодные капитальные затраты	евро/год	14 716	55 186
Операционные годовые затраты	евро/год	288 000	672 000
Общие годовые затраты	евро/год	302 716	727 186
Общие годовые затраты	евро/т клинкера	0,32	0,76
Общие годовые затраты	евро/т SO <sub>2</sub> предотвращенного	685	1 647

### **Установка мокрой сероочистки отходящих газов (WFGD)**

Следующая таблица сравнивает затраты, рассчитанные техническим секретариатом ЦГ ТЭВ на основе предыдущих документов, с обновлёнными данными, предоставленными SEMBUREAU [23].

Установка мокрой сероочистки отходящих газов	Единица	Параметры и предварительная оценка затрат (март 2019)	Параметры и обновленные данные о затратах [23]
Среднесуточные концентрации SO <sub>2</sub> до очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	400 - 1600	700 - 1300
Среднесуточные концентрации SO <sub>2</sub> после очистки	мг/Нм <sup>3</sup> при 10% O <sub>2</sub>	50 - 400	50 - 400
Инвестиции (Сарех)	тыс. евро	14 000	10 000 - 26 000
Общие операционные затраты (Орех)	евро/т клинкера	0,6	0,4-1,4
Энергопотребление для информации	кВт·ч/т клинкера		8-10

Рассчитанные затраты:

	Единица	Нижний диапазон	Верхний диапазон
<b>Выбросы SO<sub>2</sub></b>			
До обработки	т/год	1 546	2 870
После обработки	т/год	883	110
Предотвращенные выбросы	т/год	662	2 760
<b>Затраты</b>			
Инвестиции	тыс. евро	10 000	26 000
Процентные ставки	4%		
Ежегодный коэффициент амортизации	%/год	7,36	7,36
Ежегодные капитальные затраты	евро/год	735 818	1 913 126
Операционные годовые затраты	евро/год	384 000	1 344 000
Общие годовые затраты	евро/год	1 119 818	3 257 126
Общие годовые затраты	евро/т клинкера	1,17	3,39
Общие годовые затраты	евро/т SO <sub>2</sub> предотвращенного	1 691	4 917



## 10. Приложение 4 - Принципы оценки затрат

### Принципы оценки затрат

Методология, разработанная для оценки затрат, направлена на обеспечение максимальной последовательности и прозрачности. Компоненты затрат четко указаны, чтобы помочь в сравнении данных. По возможности учтены рекомендации Справочного документа по экономическим и межмедийным эффектам Европейской комиссии [14].

### Состав затрат

Для оценки НДТ важны общие годовые затраты  $C_{tot}$ , а также удельные годовые затраты на ликвидацию загрязняющего вещества  $i$ . Они определяются в соответствии с уравнениями 1 и 2.

$C_{tot} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right] = C_{cap} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right] + C_{op} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right]$	1
$C_{tot,spec,i} \left[ \frac{\text{€}}{\text{mass}} \right] = \left( C_{tot} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right] \right) \cdot (m_{i,year})^{-1} \left[ \frac{\text{year}}{\text{mass abated}} \right]$	2

Общие удельные затраты на ликвидацию загрязнения на массу загрязняющего вещества  $i$ ,  $C_{tot,spec,i}$ , рассчитываются путем деления общих годовых затрат на массу ликвидированного загрязняющего вещества  $m_{i,year}$ , обычно в метрических тоннах или килограммах. Более подробный расчет конкретных общих годовых затрат приводится в следующих главах.

### Инвестиции

Согласно [14], инвестиции должны включать три компонента:

- Расходы на оборудование для борьбы с загрязнением,
- Расходы на установку,
- Непредвиденные расходы

В таблице данного приложения представлены подробные сведения о компонентах, которые могут быть включены в каждую категорию согласно [14]. В литературных данных об инвестициях очень редко приводятся подробные сведения об учитываемых компонентах, поэтому сопоставления затруднены. Инвестиции в оборудование для борьбы с загрязнением и расходы на установку, включая разрешения, страхование, непредвиденные расходы и т. д., обычно приводятся без учета налогов.

Для расчета инвестиций в модернизацию оборудования на существующей установке коэффициент модернизации  $r$  может представлять собой дополнительные затраты по сравнению с установкой на новом предприятии.

Для расчета затрат на оборудование для борьбы с загрязнением воздуха в годовом исчислении, необходимо распределить затраты на первоначальные инвестиции на каждый год эксплуатации. Годовые капитальные затраты можно рассчитать по формуле 3 с параметрами  $p$  (процентная ставка) и  $n$  (технический или экономический срок службы оборудования).

$C_{cap} = C_{inv} \cdot \frac{(1+p)^n}{(1+p)^n - 1} \cdot p$	3
---	---

В случае, когда срок службы оборудования не известен, срок службы принимается равным сроку службы электростанции.

### Эксплуатационные расходы

Общие эксплуатационные расходы состоят из постоянных и переменных эксплуатационных расходов.

$C_{op} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right] = C_{op,fix} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right] + C_{op,var} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right]$	<b>4</b>
--	----------

Постоянные эксплуатационные расходы  $C_{op,fix}$  обычно рассчитываются в процентах от удельных инвестиций и включают в себя такие расходы, как техническое обслуживание, страхование, заработная плата и т.д..

Переменные эксплуатационные расходы  $C_{op,var}$  включают в себя затраты на коммунальные услуги, такие как электроэнергия, утилизация отходов, реагенты и т. д. Затраты на утилизацию могут быть отрицательными в случае возможности продажи остатков (например, летучей золы или гипса).

$C_{var} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right] = \sum C^{unit} \left[ \frac{\text{€}}{\text{year}} \right], \text{ unit } \{ \text{equipment, reagent, electricity, disposal} \}$	<b>5</b>
---	----------

### Адаптация к временным различиям

Из-за временной стоимости денег, инвестиции и затраты нельзя сравнивать без учета временного аспекта. Для сравнения затрат или инвестиций за разные годы были разработаны различные индексы. Один из таких индексов, индекс затрат на химико-технологических предприятиях (композиционный СЕРСИ), используется в данном документе для корректировки по времени. Согласно [20], индекс затрат не должен использоваться для периода, превышающего 5 лет.

**Таблица 22: Индекс стоимости плана химического машиностроения [19]**

Год	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009
СЕРСИ	567,5	541,7	556,8	576,1	567,3	584,6	585,7	550,8	521,9

Год	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000
СЕРСИ	575,4	525,4	499,6	468,2	444,2	402,0	395,6	394,3	394,1

## 11. Список использованных источников

- [1] CEMBUREAU 2019 – Web site accessed on January 2019  
<https://cembureau.eu/cement-101/key-facts-figures/>
- [2] CEIP 2019 – Available on  
[http://www.ceip.at/ms/ceip\\_home1/ceip\\_home/status\\_reporting/](http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/status_reporting/)
- [3] Schorcht F. and all, 2013. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide.  
<http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>
- [4] EGTEI 2003 – Final Background Document on Cement industry, 2003.  
[https://tftci.citepa.org/images/files/voc\\_emission\\_reduction\\_techniques\\_costs/bd\\_cement\\_industry\\_220803.pdf](https://tftci.citepa.org/images/files/voc_emission_reduction_techniques_costs/bd_cement_industry_220803.pdf)
- [5] Air Convention 2012. Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone amended in 2012  
[https://www.unece.org/env/lrtap/multi\\_h1.html](https://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.html)
- [6] Air Convention 2012. Aarhus Protocol on heavy metals available on  
[https://www.unece.org/env/lrtap/hm\\_h1.html](https://www.unece.org/env/lrtap/hm_h1.html)
- [7] Air Convention 2012. Guidance document on best available techniques for controlling emissions of heavy metals and their compounds from the source categories listed in annex II. Document on heavy metals available on  
<https://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrtapwelcome/guidance-documents-and-other-methodological-materials/protocol-on-heavy-metals.html>
- [8] Air Convention 2012. Guidance document on control techniques for emissions of sulphur, NO<sub>x</sub>, VOC, and particulate matter (including PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and black carbon) from stationary sources. Available on  
<https://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrtapwelcome/guidance-documents-and-other-methodological-materials/gothenburg-protocol.html>
- [9] Wesselink, B. ECOFYS 2010. The ETS paradox. Emissions trading for industrial NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> in the EU: consequences for the European cement sector. By order of CEMBUREAU, The European Cement Association
- [10] Scheuch 2016 Technology for clean air. Innovative CKB technologies for NO<sub>x</sub>–VOC–CO –Odor reduction
- [11] Beilmann R. 2016. NO<sub>x</sub> in Cement Clinker Production. Formation and Measures to minimize NO<sub>x</sub>-Emission. Technical Symposium for Reduction of Emissions. June 22nd, 2016 in Lima, Peru.
- [12] Cinti G. (Heidelberg Technology center), Maringolo V. (Cembureau), 2017. Experience on NO<sub>x</sub> emission reduction in European cement plants. 3rd Annual Meeting of the Task Force on Techno-Economic Issues (ЦГ ТЭВ) – UN-ECE Convention on Long Range Transboundary Air Pollution (LRTAP) Rome, Italy – 20 October 2017.  
<http://tftci.citepa.org/images/files/2017-10-19-20/12-Giovanni%20Cinti%20-%20NOx%20abatement%20in%20cement.pdf>
- [13] ERICCa\_LCP Emission Reduction Investment and Cost Calculation (ЦГ ТЭВ)  
<http://tftci.citepa.org/en/work-in-progress/costs-of-reduction-techniques-for-lcp>

- [14] European Commission 2006. Reference document on Economic and Cross Media EPФects. <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>
- [15] ЦГ ТЭВ technical Secretariat 2015. Estimation of costs of reduction techniques for LCP methodology. In the scope of ЦГ ТЭВ under the UNECE Air Convention. [http://tftci.citepa.org/images/files/2016-02-11/ЦГТЭВ\\_cost\\_calculation%20methodology\\_2015\\_05\\_28.pdf](http://tftci.citepa.org/images/files/2016-02-11/ЦГТЭВ_cost_calculation%20methodology_2015_05_28.pdf)
- [16] Larguier J. ( PROSERGY) 2017. Information provided to Citepa
- [17] CITEPA 2019. French national inventory of greenhouse gases and atmospheric pollutant emissions. Specific treatment of information available for cement plants.
- [18] Electricity prices for non-household consumers - bi-annual data. Eurostat, value for France, available at : [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg\\_pc\\_205&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_pc_205&lang=en)
- [19] Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI), 2000-2017
- [20] Vatavuk W. 2002. Updating the CE plant cost Index. Chemical Engineering.
- [21] UNEP 2016. Guidance on best available techniques and best environmental practices Cement Clinker Production Facilities
- [22] Bernike Anja – UBA Germany – Comments on the draft document. April 2019
- [23] CEMBUREAU – Answers to the inquiry of the ЦГ ТЭВ technical secretariat. May 2019
- [24] Commission implementing Decision of 26 March 2013 establishing the best available techniques (BAT) conclusions under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council on industrial emissions for the production of cement, lime and magnesium oxide