



**Министерство природных ресурсов  
и охраны окружающей среды  
Республики Беларусь**

**ПОСОБИЕ В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ**

**П-ООС 17.02-ХХ-20ХХ (33140)**

Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 08.06.2009 № 38 «Об утверждении инструкции о порядке сбора, накопления и распространения информации о наилучших доступных технических методах»

**«Охрана окружающей среды и природопользование.  
Наилучшие доступные технические методы  
для производства цемента»**

**Минск**

---

УДК

ОГКС 13.020

**Ключевые слова:** охрана окружающей среды, природопользование, наилучшие доступные технические методы, производство цемента

---

### Предисловие

Цели, основные принципы, положения по государственному регулированию и управлению в области технического нормирования и стандартизации установлены Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации».

1 РАЗРАБОТАНО и ВНЕСЕНО Республиканским научно-исследовательским унитарным предприятием «Бел НИЦ «Экология»

2 УТВЕРЖДЕНО и ВВЕДЕНО В ДЕЙСТВИЕ приказом РУП «Бел НИЦ «Экология» от \_\_\_\_\_ г. № \_\_\_\_

3 ВВЕДЕНО ВПЕРВЫЕ

Настоящее пособие не может быть воспроизведено, тиражировано и распространено в качестве официального издания без разрешения Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

---

Издано на русском языке

## Содержание

1 Область применения.....	1
2 Нормативные ссылки.....	1
3 Термины и определения.....	1
4 Основные положения.....	1
5 Основные технологические процессы производства цемента .....	2
5.1 Сырьевые материалы для производства цемента.....	2
5.1.1 Хранение и подготовка сырьевых материалов.....	4
5.1.2 Используемое топливо.....	4
5.1.3 Использование отходов.....	5
5.2 Обжиг клинкера .....	7
5.2.1 Вращающаяся печь.....	7
5.2.1.1 Виды вращающейся печи.....	8
5.2.2 Клинкерные холодильники.....	10
5.2.3 Складирование клинкера.....	11
5.3 Помол цемента.....	11
5.3.1 Дозирование сырья для мельницы.....	11
5.3.2 Технологии помола цемента.....	12
5.3.3 Измельчение минеральных добавок.....	12
5.3.4 Разделение частиц по размерам путем сепарации .....	12
5.3.5 Хранение цемента.....	13
5.4 Упаковка и отгрузка цемента.....	13
6 Текущие уровни потребления ресурсов и воздействия на окружающую среду .....	13
6.1 Потребление сырьевых материалов.....	13
6.2 Использование энергии.....	14
6.3 Потребление воды.....	15
6.4 Выбросы в атмосферный воздух.....	15
6.4.1 Твердые частицы.....	15
6.4.2 Оксиды азота.....	16
6.4.3 Диоксид серы.....	17
6.4.4 Оксиды углерода.....	18
6.4.5 Общие органические соединения.....	18
6.4.6 Полихлорированные пара-дибензодиоксины (ПХДД) и дибензофураны (ПХДФ).....	18
6.4.7 Металлы и их соединения.....	19
6.4.8 Хлорид и фторид водорода .....	20
6.4.9 Аммиак.....	21
6.4.10 Бензол, толуол, этилбензол и ксилол.....	21
6.4.11 Полиароматические углеводороды.....	21
6.4.12 Другие органические загрязняющие вещества.....	21
6.4.13 Влияние отходов на выбросы в окружающую среду и энергетическую эффективность при производстве цемента.....	21
6.5 Образование отходов.....	22
6.6 Сброс в водные объекты.....	22
6.7 Источники шума.....	22
6.8 Контроль параметров и выбросов, мониторинг.....	22
7 Наилучшие доступные технические методы для цементной промышленности.....	23
7.1 Общие наилучшие доступные технические методы для производства цемента.....	24
7.2 Общие первичные наилучшие доступные технические методы.....	24
7.3 Наилучшие доступные технические методы, направленные на выбор процесса и снижение потребления энергии.....	25
7.4 Наилучшие доступные технические методы использования отходов.....	25
7.5 Наилучшие доступные технические методы, направленные на минимизацию выбросов твердых частиц.....	26
7.6 Наилучшие доступные технические методы, направленные на минимизацию выбросов газообразных соединений.....	27

7.7	Наилучшие доступные технические методы, направленные на минимизацию выбросов металлов.....	29
7.8	Наилучшие доступные технические методы, направленные на минимизацию технологических потерь.....	29
Приложение А	(справочное) Краткое описание общих наилучших доступных технических методов для производства цемента.....	31
Приложение Б	(справочное) Краткое описание наилучших доступных технических методов, направленных на выбор процесса и снижение потребления энергии.....	33
Приложение В	(справочное) Краткое описание наилучших доступных технических методов, направленных на минимизацию выбросов твердых частиц.....	34
Приложение Г	(справочное) Краткое описание наилучших доступных технических методов, направленных на минимизацию выбросов газообразных соединений.....	37
Библиография		40

# ПОСОБИЕ В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Охрана окружающей среды и природопользование  
НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТА

Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне  
НАЙЛЕПШЫЯ ДАСТУПНЫЯ ТЭХНІЧНЫЯ МЕТАДЫ ДЛЯ ВЫТВОРЧАСЦІ ЦЭМЕНТУ

Environmental protection and nature management  
Best available practices for cement production

Дата введения 20XX-XX-XX

## 1 Область применения

Настоящее пособие в области охраны окружающей среды и природопользования (далее - пособие) устанавливает наилучшие доступные технические методы для производства цемента.

Настоящее пособие в соответствии с общегосударственным классификатором Республики Беларусь ОКРБ 005-2011 «Виды экономической деятельности» распространяется на процессы, включающие производство цемента (код группировки – 23510), а также использование сырьевых материалов и/или топлива.

Положения настоящего пособия носят рекомендательный характер и служат для информирования природопользователей и иных заинтересованных о наилучших доступных технических методах, применение которых позволит снизить нагрузку на компоненты природной среды, получить информацию о возможности использования тех или иных технологий при выборе вариантов технического перевооружения предприятия.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем пособии использованы ссылки на следующие технические нормативные правовые акты в области технического нормирования и стандартизации (далее – ТНПА):

СТБ EN 197-1-2015 Цемент. Часть 1. Состав, технические требования и критерии соответствия общестроительных цементов

СТБ ISO 14001–2017 Системы управления (менеджмента) окружающей среды. Требования и руководство по применению

Примечание – При пользовании настоящим техническим кодексом целесообразно проверить действие ТНПА по каталогу, составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году.

Если ссылочные ТНПА заменены (изменены), то при пользовании настоящим техническим кодексом следует руководствоваться замененными (измененными) ТНПА. Если ссылочные ТНПА отменены без замены, то положение, в котором дана ссылка на них, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

## 3 Термины и определения

В настоящем пособии применяют термины, установленные в [1], а также следующие термины с соответствующим определением:

**3.1 клинкер:** Продукт, полученный в результате физико-химических и термодинамических процессов при обжиге и спекании сырьевой муки.

**3.2 крупка:** Крупная фракция материала, возвращаемая обратно в технологию.

## 4 Основные положения

Цемент представляет собой тонкодисперсный неметаллический неорганический порошок, который при перемешивании с водой образует пасту, которая схватывается и твердеет. Гидравлическое твердение происходит благодаря образованию гидратов силикатов кальция как

результат реакции между водой и составляющими цемента, а после твердения цемент сохраняет свою прочность и стабильность даже под водой.

Цементная промышленность имеет ключевое значение для экономического развития, поскольку производит основной вид строительных материалов для жилищного, промышленного строительства и для строительства объектов инфраструктуры.

Цементная промышленность в Республике Беларусь представлена тремя заводами, расположенными в Могилевской и Гродненской областях. Такое географическое положение предприятий обусловлено залежами глины, мергеля и других, необходимых для производства цемента, ресурсов. Предприятия объединены в холдинг «Белорусская цементная компания» в 2014 году. Республика Беларусь в основном самостоятельно обеспечивает свои потребности в цементе.

Цементы общестроительного назначения включают 27 различных типов, объединенных в пять групп:

- СЕМ I — портландцемент;
- СЕМ II — портландкомпозитный цемент;
- СЕМ III — шлакопортландцемент;
- СЕМ IV — пуццолановый цемент;
- СЕМ V — композитный цемент, состав которых приведен в СТБ EN 197-1. Дополнительно имеется ряд специальных цементов, предназначенных для особого применения.

## **5 Основные технологические процессы производства цемента**

Основной химический процесс производства цемента начинается с разложения карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) при температурах свыше  $900\text{ }^\circ\text{C}$  с образованием оксида кальция ( $\text{CaO}$  или извести) и выделением газообразного диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ); этот процесс известен как кальцинирование. За ним следует процесс клинкерообразования, в котором оксид кальция реагирует при высокой температуре (обычно  $1400 - 1500\text{ }^\circ\text{C}$ ) с кремнеземом, глиноземом и оксидом железа, формируя силикаты, алюминаты и ферриты кальция, которые образуют клинкер. Клинкер измельчается или мелется совместно с гипсом и другими добавками, образуя цемент.

Принципиальная схема производства цемента приведена на рисунке 1.

### **5.1 Сырьевые материалы для производства цемента**

Природные месторождения мергеля или мела являются источником карбоната кальция. Оксиды кремния, железа и алюминия находятся в различных рудах и минералах, таких как песок, сланец, глина и железная руда.

Добыча всех природных сырьевых материалов включает горные и карьерные работы [2]. Материалы чаще всего добывают открытым способом, т.е. непосредственно с поверхности земли. Предварительно полезное ископаемое вскрывают. На первом этапе производится срезка растительного слоя бульдозером с перемещением его в штабеля. Из штабелей плодородный грунт вывозится на постоянное место складирования, где он хранится для дальнейшего использования при рекультивации земель, нарушенных открытыми горными работами. На втором этапе производится выемка пустой (вскрышной) породы перевозкой во внутренний или внешний отвалы согласно проекту разработки и плану развития горных работ.

Главные сырьевые материалы – мел, мергель и сланец или глина доставляются с карьера. В большинстве случаев карьер расположен близко к заводу, и материалы транспортируются на цементный завод для хранения и дальнейшей переработки автомобильным транспортом. Другие сырьевые материалы, как правило, поставляют из других регионов или других предприятий железнодорожным или автомобильным транспортом.

Сырьевые материалы должны иметь химический состав, который бы обеспечивал процесс обжига клинкера и его качество. В таблице 1 приведен химический состав сырьевых материалов для получения сырьевой смеси в производстве цемента.

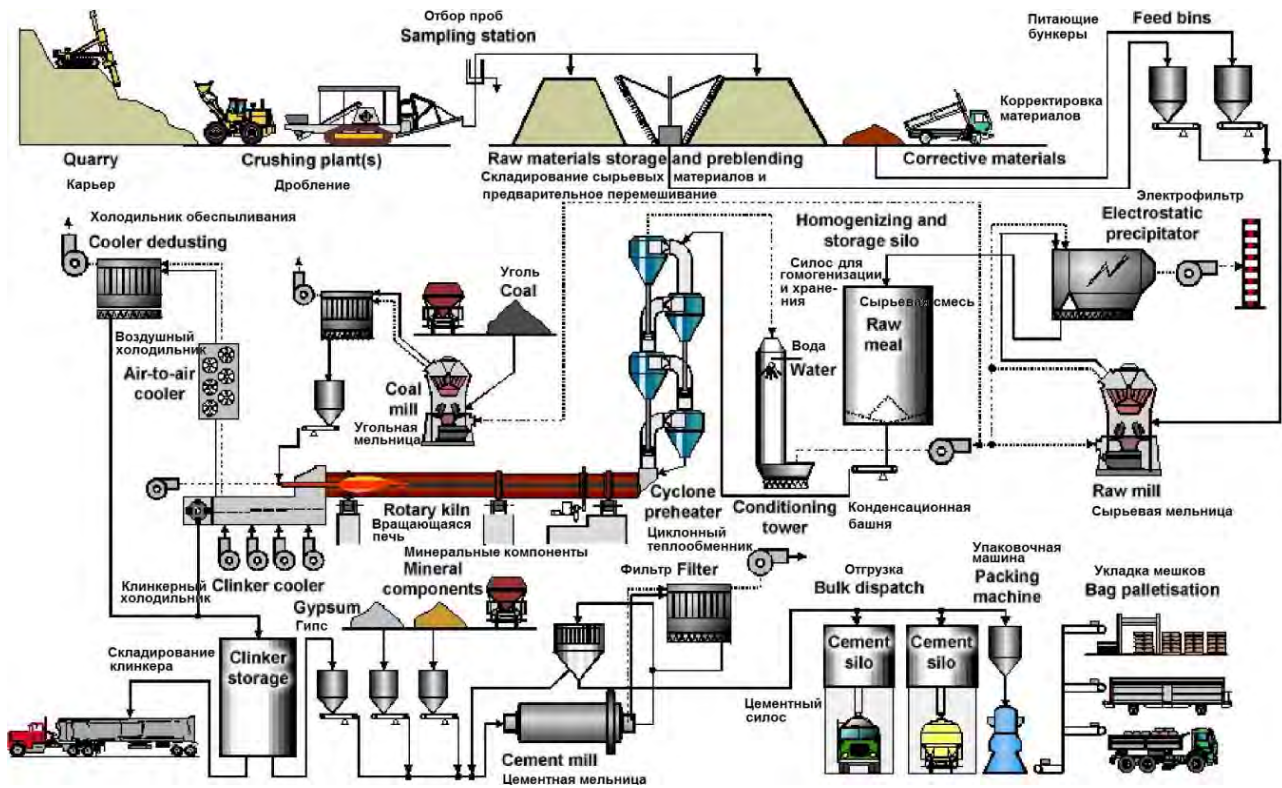


Рисунок 1 – Принципиальная схема производства цемента

Таблица 1 – Химический состав сырьевых материалов и сырьевой смеси для производства цементного клинкера

Компоненты	Мегрель, мел	Глина	Песок	Зола-унос <sup>1)</sup>	Железосодержащие	Сырьевая смесь
Содержание, %						
1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub>	0.5-50	33-78	80-99	40-60	0.5-30	12-16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1 – 20	7 – 30	0.5 – 7	20 – 30	0.2 – 4	2 – 5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2 – 5.9	4.0 – 15	0.0 – 4	5 – 15	50 – 93	1.5 – 2.5
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02 – 0.15	0.090	0.051	0.127	0.1 – 4	0.0 – 0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> и Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1 – 10	2 – 15	0.5 – 2		19 – 95	≤ 2
CaO	20 – 55	0.2 – 25	0.1 – 3	2 – 10	0.1 – 34	40 – 45
MgO	0.2 – 6	0.3 – 5	0.3 – 0.5	1.0 – 3	0.5 – 7	0.3 – 5
K <sub>2</sub> O	0 – 3.5	0.4 – 5	0.2 – 3	1 – 5	0.1 – 1	0.1 – 1.5
Na <sub>2</sub> O	0.0 – 1.5	0.1 – 1.5	0.0 – 1	0.2 – 1.5	0.1 – 1	0.1 – 0.5
SO <sub>3</sub> <sup>2)</sup>	0.0 – 0.7	0.0 – 4	0.0 – 0.5	0.0 – 1	0 – 3	0 – 1.5
Cl	0.0 – 0.6	0.0 – 1	следы		0.0 – 0.5	0.0 – 0.3
TiO <sub>2</sub>	0.0 – 0.7	0.2 – 1.8	0.0 – 0.5	0.5 – 1.5	0.0 – 3	0.0 – 0.5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0 – 0.8	0.0 – 1.0	0.0 – 0.1	0.5 – 1.5	0.0 – 1	0.0 – 0.8
ZrO <sub>2</sub>		0.02				
CaCO <sub>3</sub>	96					
Потери при прокаливании (CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O), LOI 950 <sup>3)</sup>	2-44	1-20	≤ 5	6.74	0.1-30	32-36

1) Пылевидная летучая зола

2) Общее содержание сульфатов в пересчете на SO<sub>2</sub>

3) LOI 950 - потери при прокаливании

### 5.1.1 Хранение и подготовка сырьевых материалов

Для хранения сырьевых материалов в зависимости от климатических условий и количества тонкой фракции в дробленном материале необходим крытый склад. Сырьевые материалы в относительно небольших количествах, например минеральные добавки, могут складироваться в силосах или бункерах.

Обеспечение количественного соотношения по весу компонентов, подаваемых в мельницу, является важным для постоянства химического состава смеси. Это неременное условие постоянства работы печи и высокого качества продукции. Соблюдение соотношения компонентов является также важным фактором энергетической эффективности помольной системы. Доминирующим оборудованием для обеспечения необходимого соотношения компонентов, подаваемых на мельницу, является пластинчатый весовой питатель с приводным ремнем.

При измельчении сырьевых материалов при сухом и полусухом способах производства контролируют соотношение сырьевых компонентов, измельчают и смешивают их совместно чтобы получить однородную смесь с требуемым химическим составом. Для сухого и полусухого способов сырьевые компоненты высушиваются и измельчаются до порошкообразного состояния с использованием в основном печных отходящих газов и/или воздуха из холодильника. Применение сырьевых материалов с относительно высокой влажностью требует их предварительной сушки в специальной сушилке.

Распределение частиц по размерам в продукте, выносимом из помольных установок, является очень важным для последующего процесса обжига. Необходимые параметры достигаются применением соответствующего сепаратора, классифицирующего выходящий из мельницы продукт. Для сухого разделения используется воздушный сепаратор. Большой эффективностью обладают сепараторы роторного типа.

Мокрое измельчение используется при мокром и полумокром способах производства цемента. Сырьевые компоненты измельчаются с добавлением воды, в результате чего образуется шлам. Чтобы достичь требуемой тонкости помола шлама и соответственно требуемого качества используются в основном помольные системы замкнутого цикла.

Вода и размалываемый сырьевой материал подаются в мельницу, где превращаются в шлам под действием сдвигающих и ударных воздействий при вращении мельницы. Когда достигается определенная тонкость помола материала, он проходит через решетку в стенке мельницы и насосом перекачивается для хранения.

Чтобы снизить потребление топлива, количество воды для измельчения сырьевого материала контролируется так, чтобы ее количество было минимальным для достижения необходимой текучести и прокачиваемости шлама (от 32 % до 40 % воды).

Сырьевая смесь или шлам после измельчения в дальнейшем нуждается в гомогенизации и достижения требуемой консистенции перед ее подачей в печь. Сырьевая смесь гомогенизируется и хранится в силосе, сырьевой шлам - в шламбассейне или в силосе.

Сырьевая смесь транспортируется в силос пневматической и механической системой. Объединение аэрожелоба, шнекового или цепного транспортера с ковшевым элеватором является наиболее распространенной системой транспортировки.

### 5.1.2 Используемое топливо

Для обеспечения процесса обжига теплом и энергией используются различные виды топлива (ископаемого или отходы). Для сжигания в печи используются следующие типы ископаемого топлива:

— твердое топливо (уголь, кокс, каменный бурый уголь, лигнит и в некоторых случаях сланцевое масло);

— жидкое топливо (мазут);

— газообразное топливо (природный газ).

Обычно высокая стоимость препятствует использованию природного газа или нефти в качестве топлива. Высокая температура и длительное время пребывания материала в печи создают значительный потенциал для разложения органических веществ. Это обуславливает широкое разнообразие применяемого топлива, по возможности менее дорогого, особенно различных топливосодержащих отходов (см. раздел 5.1.3).

Чтобы удерживать потери тепла на минимальном уровне, цементные печи должны эксплуатироваться с минимально возможным избытком кислорода. Это требует высокой однородности и точной дозировки топлива, а также придания ему формы для легкого и полного сгорания. Эти условия легко выполняются при использовании жидкого и газообразного топлива. Для



порошкообразного твердого топлива применяются весовые бункера, конвейеры и питатели. Основная часть подаваемого топлива (65 – 85 %) должно находиться в легко воспламеняемом, хорошо горючем виде, в то время как остальная часть (15 – 35 %) может подаваться в печь в дробленном виде или в виде кусков.

Ископаемый уголь и нефтяной кокс хранятся так же, как и сырьевые материалы, обычно в крытых складах. Вне склада топливо хранится в больших штабелях для создания долговременных запасов. При хранении топлива вне склада могут возникнуть проблемы с дренажными водами. Использование бетонных покрытий площадок складирования позволяет осуществлять сбор и очистку таких дренажных вод.

Пылевидный уголь и кокс хранятся исключительно в силосах, а мазут хранится в вертикальных стальных цистернах (резервуарах).

Твердое топливо подготавливают к использованию (дробят, измельчают и сушат) обычно в отделениях цехах. Уголь и кокс измельчаются до тонкости помола сырьевой смеси.

Используются следующие основные типы угольных мельниц:

- трубные мельницы с воздушной разгрузкой измельченного материала;
- вертикальные роликовые или шаровые кольцевые мельницы;
- ударные мельницы.

Измельченное твердое топливо может направляться для сгорания непосредственно в печи. Однако обычно оно хранится в силосах, а для его сжигания применяются термически более эффективные горелки непрямого сжигания, использующие небольшое количество первичного воздух.

Мазут используется при температуре 120 – 140 °С, что обеспечивает снижение его вязкости и облегчает дозирование и горение.

### 5.1.3 Использование отходов

Цементная промышленность в течение многих лет использовала на цементных заводах большое количество отходов. Таким образом, промышленность, являющаяся традиционно значительным потребителем природных невозобновляемых ресурсов и ископаемого топлива, внесла свой вклад по использованию отходов для сохранения этих ресурсов без производства, в свою очередь, новых отходов. Кроме того, при сжигании отходов должны учитываться требования существующих европейских и национальных нормативных актов [3].

Различные отходы могут заменять первичные сырьевые материалы и ископаемое топливо в производстве цемента и будут способствовать сохранению природных ресурсов. Обжиг клинкера сам по себе является процессом, дающим прекрасные возможности для утилизации отходов с целью снижения материало- и энергос затрат. Наиболее важные показатели процесса для утилизации отходов могут быть обобщены следующим образом:

- максимальные температуры приблизительно 2000 °С (основная горелка, температура пламени) во вращающихся печах;
- время пребывания газов во вращающейся печах при температуре около 1200 °С не менее 8 сек.;
- температура материала около 1450 °С в зоне спекания вращающейся печи;
- окислительная газовая атмосфера во вращающейся печи;
- время пребывания газов во вторичной обжиговой системе более 2 сек. при температуре выше 850 °С; в декарбонизаторе время пребывания газов ещё больше и температура выше;
- постоянная температура 850 °С во вторичной обжиговой системе или декарбонизаторе;
- постоянство условий сжигания и отсутствие колебаний вследствие высокой температуры и достаточно длительного времени пребывания;
- разложение органических загрязнителей под воздействием высокой температуры и длительного времени пребывания;
- адсорбция газовых компонентов, таких как HF, HCl, SO<sub>2</sub> на щелочных реагентах;
- высокая емкость связывания тяжелых металлов;
- короткое время пребывания отходящих газов в температурном интервале, способствующем синтезу полихлорированных дибензодиоксинов и фуранов;
- полная утилизация топливной золы в составе клинкера и, следовательно, повторное использование материала в качестве сырьевого компонента и дополнительная экономия энергии;
- специфические отходы не производятся в связи с их полным связыванием в клинкерную матрицу; однако, некоторые цементные заводы в Европе вынуждены избавляться от пыли байпасной системы;

— химико-минералогическое связывание тяжелых металлов в клинкерную матрицу.

Большое количество различных видов отходов применяется в качестве сырьевых материалов и/или топлива. Перед тем как принять решение о применении отходов, должны быть рассмотрены основные принципы их использования, такие, как предварительная сортировка и анализ технологических процессов по их подготовке. Испытания отходов должны быть выполнены для того, чтобы сохранить стандартное качество клинкера, так как топливная зола полностью захватывается клинкером. Окончательное решение о том, какой тип отходов будет принят к использованию на конкретном заводе, не может быть однотипным.

Как правило, для отходов, принятых в качестве топлива и/или сырьевых материалов для цементной печи, необходимо учитывать:

- калорийность отходов;
- количество минеральной части в отходах.

Кроме того, должны учитываться объемы отходов, а также их физический и химический состав, характеристики и загрязняющие примеси.

Отходы, используемые как сырьевые материалы и/или как топливо в цементных печах, должны обладать стандартным качеством, поскольку топливные золы полностью связываются с клинкером, минимальным негативным действием на состав клинкера и не давать дополнительных выбросов в атмосферный воздух. Чтобы гарантировать характеристики топливных отходов, требуется система менеджмента качества.

*Использование отходов в качестве сырьевых материалов*

Химическая пригодность отходов как сырьевых материалов является важным критерием в целях обеспечения требуемого состава производимого клинкера. Первичными необходимыми химическими соединениями являются материалы, содержащие известь, кремний, алюминий и железо, а также серу, щелочи и другие элементы, которые должны быть классифицированы по группам в соответствии с их химическим составом. При использовании отходов оксиды, содержащиеся в отходах, связываются в процессе обжига в клинкер, как и в случае обжига сырьевых материалов.

**Таблица 2 – Отходы, классифицированные по их химическому составу**

Группа сырьевых материалов	Отходы, применяемые в качестве сырьевых материалов
Ca – группа	Промышленная известь (отходы известняка) Известковый шлам Шлам карбида кальция Осадок очистки питьевой воды
Si – группа	Формовочный литейный песок Песок
Fe – группа	Доменный и конверторный шлак Пиритные огарки Синтетический гематит Красные шламы
Al – группа	Промышленные шламы
Si-Al-Ca – группа	Зола-унос Шлаки Мелкие отсеvy дробления, земля (грунт)
S – группа	Промышленные гипсовые отходы
F – группа	CaF <sub>2</sub> , шламы после фильтрации

Факторы, которые необходимо принимать во внимание при выборе и применении отходов в качестве сырьевого материала:

- изначально отходы состоят из тех же оксидов, что и клинкер;
- низкая концентрация тяжелых металлов, однако, необходимо учитывать присутствие ртути, таллия и аналогичных металлов;
- регулярный контроль материалов с отбором и анализом используемых отходов.

*Использование отходов в качестве топлива*

Отходы с высокой калорийностью могут заменять часть первичного топлива в цементных печах, поэтому постоянство качества отходов является обязательным (например, достаточная теплотворная способность, низкое содержание тяжелых металлов, хлора, золы, способность к горению, горючесть).

Важными характеристиками и параметрами топливных отходов являются величина калорийности, а также содержанием воды, серы, хлора, тяжелых металлов (особенно ртути и таллия) и золы. Дополнительной важной характеристикой является способность к горению (горючесть)

Технологии подготовки твердого топлива в большой степени зависят от типа отходов и требований цементной промышленности.

Жидкие топливные отходы обычно приготавливаются смешением различных отходов использованных растворителей, красок или нефтяных отходов с подходящей величиной теплотворной способности. Жидкие топливные отходы в большинстве опасные отходы. Это необходимо учитывать при обращении с ними, например, при складировании, подаче материала, чтобы предотвратить выбросы органических соединений.

Полная информация, касающаяся хранения материалов представлена в [4].

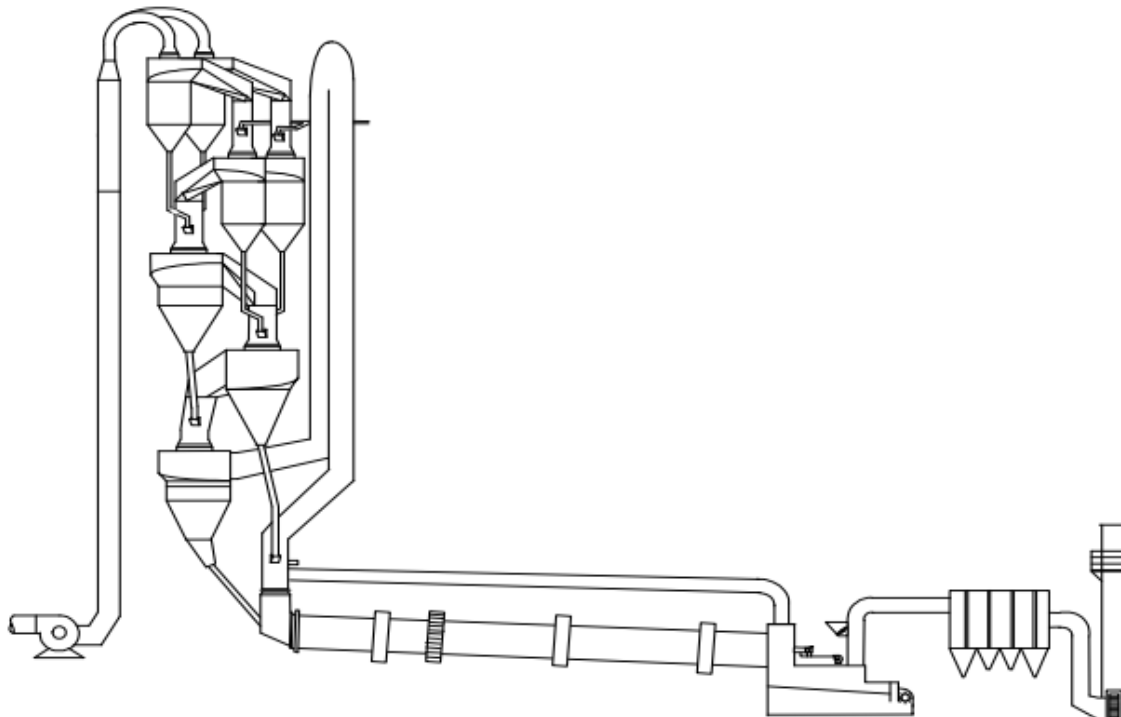
## 5.2 Обжиг клинкера

При обжиге клинкера сырьевая смесь (или сырьевой шлам при мокром способе производства) подается во вращающуюся печь, где она высушивается, подогревается, кальцинируется и обжигается с получением цементного клинкера.

В процессе обжига клинкера требуется высокая температура с целью превращения сырьевой смеси в цементный клинкер. Самым главным по существу является обеспечение температуры материала в зоне спекания в пределах 1400 – 1500 °С и температуры пламени факела около 2000 °С. Необходимо также обжигать клинкер в окислительной среде, поэтому требуется избыток воздуха в зоне обжига печи.

### 5.2.1 Вращающаяся печь

С момента появления вращающейся печи примерно в 1895 году она стала центральной частью всех современных установок по производству клинкера.



**Рисунок 2 – Схема вращающейся печи с теплообменником, декарбонизатором и колосниковым холодильником**

При технологии сухого способа производства цемента сушка, подогрев и кальцинирование обеспечивается в стационарных установках отдельно от печи.

Вращающаяся печь состоит из стальной трубы. Труба поддерживается двумя – семью (или больше) опорами, имеет наклон от 2,5 % до 4,5 % и вращается со скоростью 0,5 - 5 оборотов в минуту. Сочетание наклона с вращением обеспечивает продвижение материала вдоль печи. Чтобы

выдерживать высокую температуру, вращающаяся печь изнутри целиком облицована термостойкими кирпичами (огнеупорами).

Топливо, подаваемое в печь через главную форсунку, образует пламя с температурой около 2000 °С. Для оптимизации процесса пламя должно быть регулируемым в определенных пределах.

Устройства для сжигания угля/кокса бывают как прямого, так и непрямого сжигания. Установки прямого сжигания работают без промежуточного хранения и дозировки топлива. Измельченное топливо вдувается непосредственно в печь воздухом, используемым для разгрузки мельницы и действующим как носитель и как первичный воздух, формирующий факел.

Жидкое топливо (мазут) под соответствующим давлением и вязкостью подается через распылительную форсунку в печь для формирования факела. Формирование факела осуществляется с помощью многоканальной горелки с мазутной форсункой в центре.

Форсунки для природного газа также проектируются на многоканальном принципе.

### 5.2.1.1 Виды вращающейся печи

#### *Длинные вращающиеся печи*

Данные печи могут питаться шламом, раздробленным кеком после его фильтрации, гранулами или сухой смесью и таким образом приспособлены для всех (мокрого и сухого) типов производства.

Длинные вращающиеся печи для сухого способа спроектированы таким образом, что они уже включают в себя зоны для осуществления процессов сушки, подогрева, декарбонизации и обжига.

Приготовление сырьевых материалов по мокрому способу первоначально использовалось потому, что их гомогенизация достигалась легче. Сырьевая смесь для мокрого способа содержит от 32 % до 40 % воды. Вода необходима для поддержания жидких свойств шлама для питания печей. Вода затем должна быть испарена в специально спроектированных зонах сушки печи, где используется значительная часть теплоты горения топлива. Эта технология имеет высокую тепловую потребность и характеризуется большими количествами газов от процессов сгорания топлива и испарения воды.

#### *Вращающиеся печи с подогревателями*

Существуют следующие типы подогревателя:

— конвейерный кальцинатор

Такая технология представлена как стационарная установка, позволяющая осуществлять часть процесса обжига отдельно от вращающейся печи. Это позволило укоротить печь и соответственно снизить потери тепла, увеличить энергетическую эффективность процесса обжига клинкера.

— суспензионный теплообменник с подогревом материала во взвешенном состоянии

Подогрев и даже частичная кальцинация сухого сырьевого материала (сухой/полусухой способы) происходит во взвешенном состоянии горячими газами из вращающейся печи. Большая площадь контакта поверхности частиц сырьевой муки с газами обеспечивает почти полный теплообмен.

— шахтный теплообменник

Применение шахтных циклонных теплообменников оправдано, если в сырьевой смеси присутствует значительное количество плавней – хлоридов, сульфатов, щелочей, так как в этом случае они менее подвержены налипанию частиц сырьевой смеси на стенки теплообменника.

— четырехступенчатый циклонный теплообменник

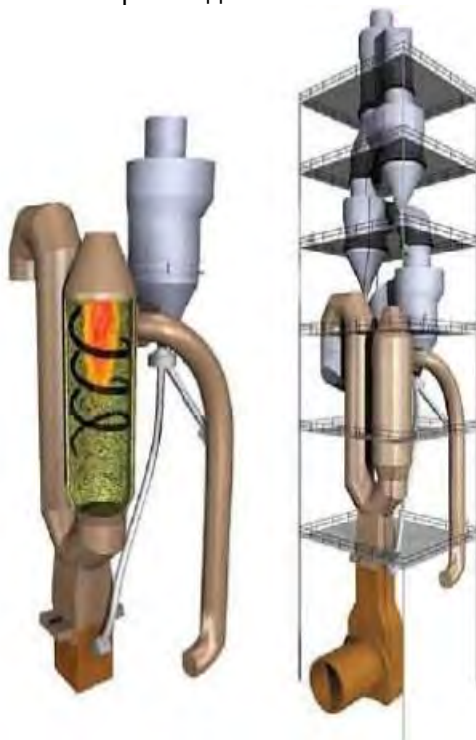
Некоторые проблемы могут возникнуть на нижней ступени циклонного теплообменника при повышенном содержании в сырьевой смеси легкоплавких соединений (хлоридов, сульфатов, щелочей). Вследствие постепенного накопления этих соединений на стенках нижнего циклона появляются пленки расплава, что приводит к прилипанию к ним частиц сырьевой смеси, общему залипанию циклона и газоходов и, в конечном итоге, к остановке печного агрегата. Для предотвращения этого явления применяют байпас части печных газов. При резком охлаждении газов, следующих в байпас (3 % – 15 % от общего объема печных газов), происходит конденсация паров легкоплавких соединений и их осаждение на пылевидных частицах сырьевой смеси. Эти частицы отделяются в циклонах.

#### *Вращающаяся печь с циклонным теплообменником и декарбонизатором*

В этом технологическом процессе тепло вводится в двух точках. Первичное топливо подается в печь в зону обжига. Дополнительно осуществляется сжигание топлива в специальной камере – декарбонизаторе, установленной между вращающейся печью и теплообменником. В этой камере сжигается до 65 % всего топлива. Использование отходящих печных газов в нижней части циклонного теплообменника и третичного воздуха обуславливают длительное пребывание материала в горячем состоянии. Энергия в основном используется для обжига сырьевой муки, которая подвергается почти

полной декарбонизации ещё до поступления в печь. Степень декарбонизации достигает почти 90 %. Горячий воздух для сжигания топлива в декарбонизаторе подается из холодильника. Материал покидает декарбонизатор с температурой 870 °С.

Печная система с пятиступенчатым циклонным теплообменником и декарбонизатором является стандартной для заводов сухого способа производства.



**Рисунок 3 – Циклонный теплообменник с декарбонизатором**

Ранее печная система с циклонными теплообменниками имела четыре ступени и характеризовалась повышенной температурой отходящих газов и повышенным потреблением топлива. Когда природные материалы имеют низкую влажность, выбирают преимущественно шестиступенчатый циклонный теплообменник в сочетании с рукавным фильтром для обеспыливания дымовых газов.

При повышенном содержании плавней (хлоридов, сульфатов, щелочей) в сырьевой смеси для поддержания нормального режима работы печи с циклонным теплообменником и декарбонизатором необходимо использовать байпас печных газов. Из-за различий в характеристиках газовых потоков байпас в печи с декарбонизатором намного эффективнее, чем простой печи с циклонным теплообменником.

Удаление части горячего материала и горячих газов приводит к повышению потребления энергии на 6 - 12 МДж/т клинкера на процент удаленного печного газа. Типичный уровень байпаса составляет 15 % при высоком содержании хлоридов и до 70 % при высоком содержании серы.

Очистка дымовых газов с извлечением оксидов серы с помощью системы байпаса может быть дополнена путем:

- использования активной извести;
- задержкой газов при высокой температуре (более 300 °С);
- задержкой газов при низкой температуре (< 200 °С) в присутствии воды (или ее паров).

Байпас может вызвать дополнительные выбросы и дополнительные расходы тепла в зависимости от его конфигурации.

#### *Шахтные печи*

Печи этого типа состоят из вертикального цилиндра, облицованного огнеупорной футеровкой. Сверху в них подаются гранулы сырьевого материала и измельченный уголь или кокс. В процессе обжига материал перемещается через короткую зону спекания в верхней, слегка расширенной части печи. Затем материал охлаждается воздухом, подаваемым снизу для горения топлива и опускается в виде клинкера в нижнюю часть печи на разгрузочную решетку.

Шахтные печи имеют невысокую производительность и поэтому они приемлемы только для малых заводов.

### 5.2.2 Клинкерные холодильники

Клинкерный холодильник является неотъемлемой частью печной системы. Холодильник имеет две задачи: рекуперировать тепло горячего клинкера (1450 °С) с возвратом его в технологический процесс и снизить температуру клинкера до приемлемого для последующего технологического процесса.

Рекуперированное тепло используется для нагрева воздуха, применяемого для сжигания топлива в первичной или вторичной системе. Быстрое охлаждение фиксирует такой минералогический состав клинкера, который повышает его размалываемость и оптимизирует гидратационную способность цемента.

Существуют два основных типа холодильников: рекуператорные и колосниковые.

*Рекуператорные холодильники:*

— барабанный

Под печь устанавливается дополнительный вращающийся барабан с отдельным приводом, соединенный с выходным концом печи. После выгрузки из печи клинкер проходит через кожух в барабан, который оборудован подъемными полками, пересыпающими продукт в проходящем воздухе.

— планетарный

Некоторое количество барабанов (от 9 до 11) прикрепляются к вращающейся печи в разгрузочном конце. Горячий клинкер поступает в каждый барабан через отверстия, размещенные по окружности вращающейся печи в местах крепления барабанов. Эффективность работы холодильника зависит от наличия подъемных и пересыпных полок внутри барабана, предназначенных для распределения потока клинкера.

Из-за невозможности использования третичного воздуха, планетарный холодильник не пригоден для использования в печах с декарбонизатором сырьевой смеси.

*Колосниковые холодильники*

Охлаждение в таких холодильниках происходит за счет пропускания воздуха снизу вверх через слой клинкера, находящийся на колосниковой решетке.

Применяются два способа транспортировки клинкера:

— движущимися решетками

Охлаждающий воздух вдувается вентилятором в камеры снизу под решетку.

Преимуществом такого проекта является ровный слой клинкера (без степенек) и возможность замены решетки без остановки печи. Из-за механической сложности и плохого теплообмена слоя клинкера пониженной толщины вблизи края решетки и стенкой холодильника эту конструкцию холодильника прекратили выпускать.

— возвратно-поступательным движением колосников

Клинкер подвергается постепенному проталкиванию по колосниковой решетке передней гранью чередующихся рядов колосников. Относительное движение передних граней осуществляется гидравлическими или механическими приводами, связанными с каждым вторым рядом. Только клинкер, но не колосники, движется от точки попадания в холодильник до разгрузочного конца.

Плиты колосников изготовлены из теплостойкого стального литья и имеют щелевые отверстия для прохождения через них воздуха.

На колосниковой решетке обычно различают две зоны:

— рекуператорную зону, из которой горячий воздух используется для горения топлива в основной горелке (вторичный воздух) и топлива, используемого в декарбонизаторе (третичный воздух);

— дополнительную зону охлаждения, где атмосферный воздух охлаждает клинкер до более низкой температуры.

Основными особенностями таких холодильников являются:

— современные плиты со встроенными устройствами с изменяющимся или постоянным перепадом давления проходящего воздуха, но непроницаемые для клинкера;

— аэрируемые плиты с нагнетанием воздуха через каналы и сопла;

— индивидуально регулируемые зоны аэрации;

— фиксированный вход материала в холодильник;

— чередование широких и узких колосников;

- роликовый измельчитель материала на выходе из дробилки;
- тепловая защита (защита металлических частей воздушным потоком).

#### *Третье поколение колосниковых холодильников*

Основная идея этих холодильников основана на разделении систем продвижения клинкера и воздухораспределительной системы с целью их максимальной оптимизации. В данном типе холодильников изолирующий колосники воздух не используется и распределение воздуха оптимизировано для всех используемых операций.

Основными особенностями этих типов холодильников являются:

- одна наклонная или горизонтальная закрепленная колосниковая решетка;
- клинкер транспортируется крестовиной, движущимся полом или похожими устройствами и отделен от системы распределения воздуха;
- устранено просыпание клинкера под решетку;
- устранен изолирующий воздух и добавлена система автоматического контроля распределения воздуха;
- улучшается эффективность транспортировки клинкера, устраняются проблемы, связанные с повышенной флюидизацией тонкодисперсных фракций клинкера.

Холодильники нового типа пригодны для эксплуатации совместно с печами большой производительности.

### **5.2.3 Дополнительная выработка электрической энергии**

На цементных заводах может использоваться система выработки электрической энергии за счет избытка тепла из цементного производственного процесса.

Тепло от клинкерных печей может использоваться для:

- сушки сырьевых материалов или их одновременной сушки и измельчения;
- сушки шлака;
- сушки песка;
- сушки и измельчения топлива.

Заводы с многостадийными циклонными теплообменниками с и без декарбонизатором приспособлены для использования определенных видов сырьевых материалов. Когда сырьевые материалы имеют высокую влажность, выходящий из колосникового холодильника горячий воздух также используется в процессе подготовки материала.

### **5.2.4 Складирование клинкера**

Клинкер цемента хранятся в силосах или закрытых складах. Большие запасы могут складироваться на открытых площадках; в этом случае необходимо предусматривать меры против загрязнения пылью окружающей среды.

Склады хранения клинкера представляют собой:

- прямые штабельные склады с гравитационной разгрузкой (ограниченная сохраняемость материала);
- кольцевые штабельные склады с гравитационной разгрузкой (ограниченная сохраняемость материала);
- клинкерные силосы (при разгрузке клинкера из силоса до определенного уровня могут появиться проблемы с зависанием материала; хорошая сохраняемость материала);
- куполообразный клинкерный склад (ограниченная сохраняемость материала).

### **5.3 Помол цемента**

Помол цементного клинкера является важной технологической операцией в процессе производства цемента. От этой операции в значительной степени зависит качество цемента. Технология помола цемента ставит своей задачей получение высокопрочного вяжущего материала, минимизацию затрат электроэнергии и повышение экологической безопасности этого процесса.

Портландцемент получается путем совместного помола портландцементного клинкера с сульфатсодержащим материалом – гипсом или ангидритом. В смешанных цементах (композитных цементах) могут присутствовать и другие компоненты – гранулированный доменный шлак, зола – унос, природные или искусственные пуццоланы, известняк или инертный филлер.

Способ помола цемента зависят от типа производимого цемента.

Большинство мельниц работает в замкнутом цикле, при котором цемент с заданной тонкостью помола отделяется от измельченного материала, а крупка направляется на доизмельчение.

### 5.3.1 Дозирование сырья для мельницы

Точная и постоянная дозировка компонентов является необходимым условием поддержания высокой эффективности помольной системы. Для этой цели наиболее часто используются весовые ленточные питатели-дозаторы.

### 5.3.2 Технологии помола цемента

Для тонкого измельчения цементов обычно используют следующие помольные системы:

— шаровые барабанные мельницы замкнутого цикла (при этом содержание минеральных добавок в цементе может быть ограничено, если не осуществляется их сушка в мельнице или перед подачей в мельницу);

— вертикальные валковые мельницы (наиболее пригодны при большом количестве вводимых добавок благодаря их высокой сушильной производительности, а также для отдельного размола минеральных добавок;

— пресс-валки (при этом ввод минеральных добавок ограничивается, если не осуществляется предварительная сушка добавки).

Другие используемые помольные системы:

— трубная мельница открытого цикла;

— трубная мельница замкнутого цикла с воздушно-проходным, центробежным сепаратором или сепаратором с выносными циклонами старого поколения;

— горизонтальные роликовые мельницы.

#### *Шаровые (трубные) мельницы*

В зависимости от заданной тонкости помола в качестве мелющих тел используются стальные шары различного размера. Этот тип мельницы легко эксплуатируется в стабильных условиях и имеет высокую надежность и пригодность. Ввод минеральных добавок ограничен при их высокой влажности, поэтому они должны подвергаться сушке горячими газами, проходящими через мельницу, или путем использования тепла процесса измельчения.

Шаровые мельницы потребляют повышенное количество энергии и стоят последними в ряду известных мельниц по энергетической эффективности.

#### *Вертикальные валковые мельницы*

Принцип работы основан на действии от двух до четырех мелющих роликов, закрепленных на шарнирных кронштейнах и перекатывающих по горизонтальной измельчающей плите или помольной чаше. Эти мельницы особенно пригодны для одновременного измельчения и сушки цементных материалов или шлака, поэтому вертикальные валковые мельницы используются для помола материала с относительно высокой влажностью.

*Сдвоенные пресс-валки* высокого давления имеют сравнительно большие эксплуатационные расходы. Они часто используют в сочетании с шаровыми мельницами.

#### *Горизонтальная роликовая мельница*

Данная мельница состоит из короткого горизонтального цилиндрического корпуса, опирающегося на гидродинамические или гидростатические подшипники. Корпус вращается венцовой шестерней. Внутри корпуса имеется горизонтальный ролик, который свободно вращается, с силой прижимаясь гидравлическими цилиндрами к внутренней поверхности корпуса. Материал измельчается, проходя в течение короткого времени между роликом и корпусом. Измельченный материал выходит из мельницы и направляется в сепаратор, который отделяет крупку и возвращает ее в мельницу.

### 5.3.3 Измельчение минеральных добавок

Минеральные добавки обычно измельчаются совместно с клинкером и гипсом. Необходимость измельчать их отдельно в основном зависит от:

— процентного содержания минеральных добавок в конечном продукте и цементном производстве в целом;

— наличия дополнительной мельницы в рабочем состоянии;

— больших различий в размалываемости клинкера и минеральных добавок;

— влажности минеральных добавок.

Если требуется предварительная сушка минеральных добавок, она может осуществляться путем использования либо печных отходящих газов и/или газов, выходящих из холодильника, либо путем использования независимых источников горячего газа.

### 5.3.4 Разделение частиц по размерам путем сепарации



Разделение частиц, выходящих из мельницы, по размерам (сепарация) оказывает значительное влияние на качество цемента. Сепарация достигается применением специальных установок – воздушных сепараторов.

Воздушные сепараторы с роторами имеют ряд преимуществ:

- низкое потребление энергии помольной системой (меньшее переизмельчение продукта);
- повышенная эффективность;
- возможность охлаждения продукта;
- высокая гибкость в установки тонкости помола продукта;
- лучший контроль распределения частиц по размерам, лучшая однородность продукта.

### 5.3.5 Хранение цемента

Для подачи цемента в силос используется как пневматический, так и механический вид транспорта.

Объединение пневматического конвейера или винтового транспортера (шнека) с ковшовым элеватором является наиболее применяемой транспортной системой.

Различные цементы складываются в отдельные силосы. Однако конфигурации некоторых силосов позволяют хранить более одного типа цемента и могут быть следующими:

- одноячейковый силос с разгрузочным хоппером;
- одноячейковый силос с центральным конусом;
- многоячейковые силосы;
- куполообразный силос с центральным конусом.

### 5.4 Упаковка и отгрузка цемента

Цемент подается из силоса либо непосредственно навалом в железнодорожные вагоны либо на упаковку.

## 6 Текущие уровни потребления ресурсов и воздействия на окружающую среду

Основными видами воздействия на окружающую среду, касающиеся цементной промышленности, являются выбросы в атмосферный воздух и использование энергии. Сбросы в водные объекты обычно являются поверхностными, и не приводит к растворению веществ в воде и ее загрязнению. Хранение и подготовка топлива являются потенциальным источником загрязнения почвы и грунтовых вод.

Оценка потребления ресурсов и воздействия на окружающую среду требует первичного знания технологического процесса, его входных и выходных потоков:

• *входные потоки:*

- сырьевые материалы (обычные и/или отходы);
- энергия (топливо (обычное и/или отходы и/или биомасса), электрическая энергия);
- вода (включая влажность топлива, влажность сырьевых материалов, влажность воздуха и воду, вводимую в сырьевой шлам);
- воздух (первичный воздух, воздух для транспортировки материалов, воздух для охлаждения и утечки воздуха);
- вспомогательные материалы (минеральные добавки, упаковочные материалы).

• *выходные потоки:*

- клинкер;
- производственные потери/отходы (уловленная пыль);
- выбросы в атмосферный воздух (пыль, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, шум и др.);
- сбросы в водные объекты (при мокром способе).

### 6.1 Потребление сырьевых материалов

Цементное производство является материалоемким процессом.

**Таблица 3 – Потребление сырьевых материалов при производстве цемента**

Материал	на 1 т клинкера	на 1 т цемента
Известняк, глина, сланец, мергель и др.	1.57	1.27
Гипс, ангидрит	-	0.05
Минеральные добавки	-	0.14

При обжиге клинкера отходы могут заменять значительное количество сырьевых материалов (см. раздел 5.1.3).

Отходы, как сырьевые материалы для производства портландцементного клинкера характеризуются химическим и компонентным составом. Эти отходы могут влиять на процесс выбросов и сами выбросы.

## 6.2 Использование энергии

Цементная промышленность является энергоемким производством, зависящим от используемого способа производства. При производстве цемента используется два типа энергии: топливо и электрическая энергия.

Теоретическое количество потребляемой *тепловой энергии (топлива)* для получения клинкера определяется энергией, необходимой для реакций минералообразования клинкера в процессе обжига (1700 – 1800 МДж/т клинкера) и тепловой энергии, необходимой для сушки и подогрева сырьевых материалов, которая зависит от их влажности.

Удельные расходы тепла на обжиг клинкера зависят от типа печей, их размеров и типов выпускаемых цемента.

Практика показывает, что удельный расход тепла на обжиг клинкера заводами, работающими по сухому способу с многоступенчатыми циклонными теплообменниками и декарбонизаторами, изменяется от 3000 кДж/т клинкера и может быть больше 3800 кДж/т клинкера (среднегодовая величина). Изменчивость этих показателей обусловлена пуском-остановкой агрегатов и различиями в свойствах сырьевых материалов.

**Таблица 4 – Удельные расходы тепла при производстве цемента**

Потребность тепловой энергии (МДж/т клинкера)	Процесс
3000 – 4000	Печи сухого способа, многостадийный (от 3 до 6 стадий) циклонный теплообменник и декарбонизатор
3100 – 4200	Вращающаяся печь сухого способа, оборудованная циклонными теплообменниками
3300 – 5400	Полусухой / полумокрый способ
до 5000	Длинные печи сухого способа
5000 – 6400	Длинные печи мокрого способа
3100 – 6500 и выше	Шахтные печи и печи для производства специальных цементов

На удельный расход тепла на обжиг клинкера влияют следующие факторы:

- схема и конструкция линии обжига клинкера;
  - количество ступеней циклонного теплообменника (три или шесть)
  - наличие декарбонизатора
  - использование третичного воздуха
  - использование сушильного агента в сырьевой мельнице
  - отношение длины печи к ее диаметру
  - тип клинкерного холодильника
- общее количество материала, проходящего через печь;
- содержание влаги в сырьевых материалах и топливе;
- свойства сырьевых материалов, их обжигаемость;
- калорийность топлива;
- тип клинкера;
- гомогенизация и точность дозирования питания топлива, подаваемого в печь;
- оптимизация процесса контроля, включая охлаждение пламени;
- степень байпасирования газов.

Главными потребителями *электрической энергии* являются мельницы (помол цемента и сырья), вытяжные вентиляторы и дымососы (печи, сырьевые и цементные мельницы), которые все вместе потребляют более 80 % электрической энергии.

Электрическая энергия достигает 20 % общей потребности в энергии. Величина потребляемой электрической энергии колеблется от 90 до 150 кВт·ч/т цемента.

Мокрый способ является более энергоемким, чем полумокрый или сухой способы.

Расход электроэнергии обусловлен природой измельчаемого материала и особенностями процесса его измельчения.

Для того, чтобы покрыть необходимую потребность в технологическом топливе используют *топливные отходы* и обычное топливо.

Вплоть до 100 % потребления тепла может быть обеспечено использованием топливных отходов при сухом способе, с печной установкой, оборудованной четырехступенчатым двухветвевым циклонным теплообменником и планетарным холодильником.

Следует отметить, что калорийность топливных отходов изменяется в широких пределах – от 3 до 40 МДж/кг. Литературные источники показывают, что калорийность обычного топлива в среднем составляет 26 – 30 МДж/кг для угля, 40 – 42 МДж/кг для мазута, тогда как калорийность обычных твердых топливных отходов – 8.5 МДж/кг.

Информация о калорийности различных видов отходов может быть найдена в [5].

### 6.3 Потребление воды

Вода используется на ряде стадий производственного процесса. В некоторых случаях вода используется только для подготовки сырьевых материалов (шлама), а также в процессах обжига и охлаждения, для охлаждения газов. В полусухом способе вода используется для гранулирования сухой сырьевой смеси. Заводы, работающие по мокрому способу, используют больше воды (на тонну выпущенного цемента) для приготовления шлама и типично потребление воды составляет 100 – 600 л на тонну клинкера.

### 6.4 Выбросы в атмосферный воздух

Применительно к цементному производству в список включены следующие выбросы загрязняющих веществ:

- оксида азота (NO<sub>x</sub>) и другие соединения азота;
- диоксид серы (SO<sub>2</sub>) и другие соединения серы;
- твердые частицы;
- суммарные органические соединения, включая летучие органические соединения;
- полихлорированные дибензодиоксины и дибензофураны;
- металлы и их соединения;
- фтористый водород (HF);
- хлористый водорода (HCl);
- оксид углерода (CO).

Основными выбросами при производстве цемента являются выбросы в атмосферный воздух из печной системы. Это происходит вследствие физико-химических реакций, происходящих с сырьевыми материалами, а также при горении топлива. Главными составляющими отходящих газов цементной печи являются азот из воздуха, участвующего в горении топлива, CO<sub>2</sub>, образующийся при разложении CaCO<sub>3</sub> и сгорании топлива, пары воды, появляющиеся в процессе сжигания топлива и из сырьевых материалов, избыток кислорода.

Во всех печных системах обжигаемый материал движется противотоком (навстречу) по отношению к топочным газам. Этот противоток влияет на величину выбросов, так как образуется своего рода кипящий слой. Многие компоненты, которые образуются при горении топлива и при превращении сырьевых материалов в клинкер, остаются в газовой фазе до тех пор, пока они не адсорбируются или конденсируются на движущемся материале.

Типичные объемы печных отходящих газов, выражаемые в м<sup>3</sup>/т клинкера (сухой газ с температурой 273 К и давлением 101,3 кПа) колеблются в пределах 1700 – 2500 для различных печей.

Имеются также выбросы твердых частиц от других источников, таких как, помол и разгрузка сырьевых материалов, твердого топлива и готового продукта – цемента. Колебания величин таких выбросов могут быть значительными и если эти аспекты не учитываются конструкцией агрегата или установки, они могут привести к неприятным последствиям.

#### 6.4.1 Твердые частицы

Главными источниками выделения твердых частиц являются процесс приготовления сырьевых материалов, установки по измельчению и сушке, процесс обжига клинкера (печи и холодильники), подготовка топлива и установки для помола цемента (мельницы). Вспомогательные процессы на цементном заводе также могут привести к выделению твердых частиц.

Твердые частицы – это мелкие (менее 0,1 мм) частицы минерального или органического происхождения, взвешенные в воздухе или газе, которые характеризуются разной дисперсностью.

Источники выбросов пыли промышленных предприятий бывают стационарными, когда координата источника выброса не изменяется во времени, и передвижными (нестационарными), например, автотранспорт. Источники выбросов твердых частиц подразделяются также на организованные и неорганизованные. Из организованного источника твердые частицы поступают в атмосферный воздух через специально сооруженные газоходы, воздухопроводы и трубы. Неорганизованный источник образуется в результате нарушения герметичности оборудования, отсутствия или неудовлетворительной работы оборудования по удалению твердых частиц в местах загрузки, выгрузки или хранения материалов. К неорганизованным источникам относят дороги, автостоянки, склады сыпучих материалов и другие площадные источники.

*Тонкодисперсные твердые частицы (менее 10 и 2,5 мкм)*

Такой тип твердых частиц является результатом серии физико-химических реакций, например взаимодействием оксидов азота, серы и аммиака, реагирующих с образованием сульфатов и нитратов аммония.

Количество твердых частиц фракции до 10 (до 2,5) мкм после обеспыливания газов в рукавных и электрофильтрах может достигать 87 – 99 % от массы частиц, уносимых безвозвратным пылеуносом.

Снижение безвозвратных выбросов твердых частиц имеет важные технологические аспекты: как правило, твердые частицы представляют собой достаточно энергоемкий продукт, поэтому их возврат в технологический процесс снижает общую энергоемкость процесса производства и улучшает качество конечного продукта.

Для снижения выбросов твердых частиц на цементных заводах используются различные устройства: пылесадительные камеры, циклоны (одиночные или групповые), скрубберы (мокрые циклоны), рукавные фильтры и электрофильтры.

**Таблица 5 – Средние значения эффективности обеспыливания технологических газов в устройствах различного типа**

Устройство	Эффективность обеспыливания (%)		
	По общему количеству твердых частиц	Частицы менее 10 мкм	Частицы менее 2,5 мкм
Циклон	70-75	52-55	30-33
Электрофильтр	95-99	94-99	93-99
Рукавный фильтр	97-99	98-99	95-99
Скруббер	90-99	92-98	85-96

#### 6.4.2 Оксиды азота

Процесс обжига клинкера является высокотемпературным процессом, в результате которого образуются оксиды азота. Эти оксиды представляют собой одни из ключевых загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух цементными заводами.

Имеются два источника для появления  $NO_x$ :

- тепловые  $NO_x$ :

- часть азота в воздухе горения взаимодействует с кислородом с образованием оксидов азота;
- основной механизм образования оксидов азота в печном пламени;

- топливные  $NO_x$ :

— соединения, содержащие азот, химически связанные в топливе, реагируют с кислородом воздуха с образованием различных оксидов азота.

*Тепловой  $NO_x$*  образуется при температуре около 1050 °С. Из-за необходимости получения качественного клинкера процесс обжига происходит в окислительной атмосфере, которая частично окисляет молекулярный азот из воздуха в пламени с образованием монооксида азота.

Тепловой  $NO_x$  образуется в основном в зоне обжига. Количество тепловых  $NO_x$ , образующихся в зоне горения, зависит от температуры в зоне горения и количества кислорода (коэффициент избытка воздуха). Скорость реакции образования  $NO_x$  увеличивается с повышением температуры. Скорость реакции также увеличивается с повышением содержания кислорода (коэффициент избытка воздуха). Работа печи с повышенным содержанием кислорода на холодном конце приводит к повышению количества  $NO_x$  в зоне горения (хотя выделение  $SO_2$  и  $CO$  может снизиться).

Тепловые  $NO_x$  образуются преимущественно при сжигании газообразного топлива (природный газ и сжиженный нефтяной газ) и топлива, в котором не содержатся вещества, имеющие в своем составе азот.

$NO$  и  $NO_2$  являются доминирующими оксидами азота в отходящих газах цементной печи.

Топливные  $\text{NO}_x$  из азотсодержащих соединений топлива являются менее важными. Во вращающейся печи образование топливного  $\text{NO}$  (оксид азота) в зоне горения незначительно. Выделение  $\text{NO}_x$  обусловлено в большей степени за счет азота воздуха, подаваемого на горение, чем их образованием при окислении азотсодержащих соединений топлива. Расчетное количество  $\text{NO}$  составляет 95 % и  $\text{NO}_2$  5 % в общем количестве оксидов азота в отходящих газах вращающихся печей.

Топливные  $\text{NO}_x$  накапливаются при горении азота, присутствующего в топливе, при более низкой температуре, преобладающей в установках вторичного сжигания топлива (декарбонизаторах). Азот топлива либо соединяется с другими атомами с образованием газа  $\text{N}_2$ , либо реагирует с кислородом с образованием топливного  $\text{NO}_x$ . В декарбонизаторе превалирует температура 850 – 950 °С, которая недостаточно высока для образования значительного количества теплового  $\text{NO}_x$ , но топливный  $\text{NO}_x$  в этих условиях может образоваться.

Выделение  $\text{NO}_x$  очень зависит от типа используемого процесса. Кроме температуры и содержания кислорода (коэффициент избытка воздуха) на образование  $\text{NO}_x$  может оказывать влияние форма пламени и температурный профиль, геометрия камеры горения, реакционная способность и содержание  $\text{NO}_x$  в топливе, присутствия влаги, длительность реакции горения и конструкции горелки.

Для снижения  $\text{NO}_x$  используется также охлаждение пламени. Использование данного метода позволяет снизить уровень выбросов на 10 % – 35 %.

### 6.4.3 Диоксид серы

Выбросы  $\text{SO}_2$  на цементных заводах зависят от общего количества сульфатных соединений, применяемого способа производства и в первую очередь определяются содержанием летучей серы в сырьевых материалах и в топливе. Потенциальные выбросы  $\text{SO}_x$  зависят от циркуляции серы в печи. Сера выбрасывается из печей в виде  $\text{SO}_2$  в отходящих газах,  $\text{CaSO}_4$  и других компонентов клинкера и твердых частиц. Однако большая часть серы включается в клинкер или выгружается из системы.

В зависимости от месторождения сырьевые материалы могут содержать серу в виде сульфатов и сульфидов. Сульфаты – это стабильные соединения, которые только частично разлагаются термически при высокой температуре в зоне спекания вращающейся печи, но разложение может увеличиться при наличии местной восстановительной среды при горении топлива и отходов. Следовательно, сера в форме сульфата более или менее полностью выходит из печи с клинкером при сохранении его качества. Сульфиды наоборот окисляются ещё в теплообменнике и частично выделяются в форме диоксида серы.

Сера, поступающая в печь с топливом, окисляется до  $\text{SO}_2$  и не ведет к значительному увеличению выбросов благодаря наличию сильных щелочей в зоне спекания, зоне кальцинирования и на стадии подогрева. Сера вступает в зону кальцинирования вместе с небольшим количеством  $\text{SO}_2$ , образующегося в результате частичного разложения сульфатов в зоне обжига. В зоне кальцинирования  $\text{SO}_2$  реагирует со щелочами и щелочными сульфатами, имеющимися в сырьевых материалах. При контакте с частично декарбонизированной сырьевой смесью избыток  $\text{SO}_2$  реагирует первоначально с образованием  $\text{CaSO}_3$ , а затем –  $\text{CaSO}_4$ . Эти сульфаты снова поступают во вращающуюся печь. Создается кругооборот серы в печи, которая находится в равновесии с выходом серы с клинкером.

Увеличение выбросов  $\text{SO}_2$  можно ожидать при наличии в сырьевых материалах органической серы или серы в легко окисляемой форме, например в виде пирита.

Концентрация выбросов  $\text{SO}_2$  увеличивается с увеличением количества летучей серы в используемых материалах.

При использовании различных методов контроля за выбросами диоксида серы, например, применение гидроксида кальция, выделения  $\text{SO}_2$  значительно снижаются.

В отличие от зоны декарбонизации, в циклонном теплообменнике 40 % – 85 % образующегося  $\text{SO}_2$  вновь связывается в нелетучие соединения. Основными факторами, влияющими на степень связывания  $\text{SO}_2$  карбонатом кальция, являются содержание паров воды и концентрация пыли в циклонном теплообменнике, а также содержание кислорода в отходящих газах. Избыток кислорода (1 % – 3 %  $\text{O}_2$ ), обычно используемого на цементных заводах для обеспечения качества цементной продукции, будет достаточным для окисления сульфидов до  $\text{SO}_2$ . В длинных печах контакт между  $\text{SO}_2$  и щелочными материалами не так хорош, поэтому сера из топлива и особенно топливных отходов может привести к значительному увеличению выбросов  $\text{SO}_2$ .

Факторы, влияющие на захват  $\text{SO}_2$ , включают влажность сырьевых материалов, температуру мельницы, время пребывания материала в мельнице, тонкость помола материала. Важно, чтобы

работа сырьевых мельниц была оптимизирована таким образом, чтобы сырьевая смесь была способна снижать количество  $SO_2$  перед подачей ее в печь.

При отклонении от нормальных условий работы печи выбросы  $SO_2$  возрастают; к таким условиям относится обжиг в восстановительной среде, что снижает степень связывания серы. Причиной этого могут быть:

- неполное сгорание топлива в декарбонизаторе или неполное сгорание грубых частиц топливных отходов в холодном конце печи;
- излишне горячая зона обжига, что может привести к появлению в печи трудносжигаемой топливной смеси;
- избыток серы из-за щелочей в питании печи;
- экстремальные величины кругооборота серы, циркулирующей между печью и циклонным теплообменником.

#### **6.4.4 Оксиды углерода**

##### *Оксид углерода*

Оксид углерода  $CO$  в дымовых газах клинкерообжигательных печей может появиться двумя путями. Первый путь связан с неполным сгоранием технологического топлива при недостаточном количестве кислорода в воздухе или недостаточном количестве воздуха, подаваемого во вращающуюся печь или в декарбонизатор вращающейся печи. Однако такое увеличение выбросов  $CO$  обычно совпадает со снижением выбросов оксидов азота  $NO_x$ . Второй путь связан с присутствием различных органических соединений, содержащих углерод, в сырьевых материалах.

Выбросы  $CO$ , как правило, увеличиваются при пуске или остановке вращающихся печей, при нестабильном питании печи топливом или при использовании топлива с резко изменяющимися характеристиками. При стабильной работе и правильной настройке печного агрегата выбросы  $CO$  из печей для обжига клинкера обычно невелики.

##### *Диоксид углерода*

Около 62 % от общего количества  $CO_2$  выделяется в процессе декарбонизации известняка сырьевой смеси, а оставшееся 38 % – при сгорании топлива. Выделение  $CO_2$  при сгорании топлива прямо пропорционально удельному расходу тепла на обжиг клинкера и отношению содержания в нем углерода к его теплотворной способности.

За последние годы выделение  $CO_2$  при сгорании топлива снизилось в связи с постоянным увеличением эффективности процессов его сжигания в печи. Сегодня технологии для контроля выбросов  $CO_2$  в цементной промышленности находятся в стадии разработки или опытной проверки. Сокращения выбросов были в основном сосредоточены на двух основных аспектах: сокращение энергии (электрической и термической), необходимой для производства продукции, а также в цементном секторе – частичной замене клинкера другими материалами (вяжущие/добавки).

#### **6.4.5 Общие органические соединения**

В тепловом процессе появление летучих органических соединений (и оксида углерода) в основном связано с неполным сгоранием топлива. В цементных печах при нормальных и стабильных условиях работы выбросы этих веществ будут меньше благодаря применяемому типу печи, времени пребывания газов в печи, высокой температуре, природы пламени (2000 °C) и избытку кислорода. В этих условиях органические соединения разлагаются с высокой эффективностью (> 99,9 %). Эти выбросы могут увеличиваться при внезапных остановках или при ненормальных условиях эксплуатации оборудования.

Выбросы летучих органических соединений могут появиться на первых стадиях процесса обжига (теплообменник, декарбонизатор), когда органическое вещество, присутствующее в сырьевой смеси, улетучивается при нагревании материала. Органическое вещество высвобождается при температурах 400 – 600 °C.

#### **6.4.6 Полихлорированные пара-дибензодиоксины (ПХДД) и дибензофураны (ПХДФ)**

Дибензодиоксины и дибензофураны могут образовываться в результате сложных процессов, зависящих от конструкции печи, условий горения, условий питания печи и типа эксплуатируемого обеспыливающего оборудования. Кроме того, присутствие хлора совместно с органическими соединениями может потенциально вызвать образование ПХДД и ПХДФ в любом высокотемпературном процессе. Указанные соединения могут образоваться в циклонном теплообменнике или после теплообменника, в установках обеспыливания, если в сырьевых материалах присутствуют в достаточном количестве хлор и углеводороды.

Однако образование дибензодиоксинов и дибензофуранов и их последующие выбросы происходит, если одновременно соблюдаются пять условий:

- наличие углеводородов;
- наличие хлоридов;
- наличие катализатора:
  - считается, что  $\text{Cu}^{2+}$  (и  $\text{Fe}^{2+}$ ) оказывают каталитический эффект;
- наличие соответствующего температурного интервала:
  - между 200 и 450 °С с максимумом при 300 – 325 °С;
- длительное время пребывания материалов в соответствующем интервале температур.

Преобразование хлордibenзооксинов и дибензофуранов может осуществляться в температурном интервале 450 – 200 °С. Таким образом, важно, чтобы газы, выходящие из печной системы, быстро охлаждались ниже этих температур. На практике это достигается тем, что дымовые газы в теплообменнике контактируют с сырьевыми материалами. Образование ПХДД и ПХДФ в теплообменнике не происходит при превышении температуры, при которой эти соединения разлагаются. Быстрое разложение ПХДД и ПХДФ происходит при температурах выше 925 °С. Более того, деструкция поддерживается динамикой процесса перемещения материала в более горячие зоны теплообменника, в то время как газ перемещается в более холодные зоны. Адсорбированные на материале, поступающем в печь, ПХДД и ПХДФ транспортируются к зонам с повышенной температурой (400 – 600 °С), где они термически разлагаются. Они переходят в газовую фазу и в более холодных зонах (200 – 300 °С) ресублимируются на материале, входящем в печь. Следовательно, благодаря длительному времени пребывания в печи и высокой температуре, при постоянных режимах работы печи выбросы указанных соединений в основном невелики.

#### 6.4.7 Металлы и их соединения

Металлы и их соединения поступают в печь для обжига клинкера с сырьевыми материалами и с технологическим топливом. Их концентрация может изменяться в широких пределах. Уровень эмиссии металлов в атмосферу определяется сложными механизмами.

Все металлы могут быть разделены на 4 класса в зависимости от летучести металлов и их солей:

1. Металлы, которые индивидуально или в смеси представляют собой тугоплавкие, нелетучие вещества, такие как Ba, Be, Cr, As, Ni, Al, Ni, Ca, Fe, Mn, Cu и Ag:

- эти металлы полностью адсорбируются клинкером и выводятся вместе с ним, поэтому не циркулируют в печной системе; в отходящих газах имеются только выбросы пыли; величина выбросов пыли зависит только от эффективности пылеотделения; выбросы этих металлов крайне малы;

2. Металлы или их соединения, являющиеся полулетучими: Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K и Na:

- эти металлы конденсируются в виде сульфатов и хлоридов в температурном интервале 700 – 900 °С и циркулируют в печи; полулетучие элементы аккумулируются в теплообменнике и осаждаются в циклонах, и в большом количестве, почти полностью остаются в клинкере;

3. Таллий Tl или его смесь с летучими соединениями:

- соединения таллия (например, хлорид таллия) конденсируются в интервале 450 – 550 °С, в случае использования печей с циклонными теплообменниками – в верхней зоне теплообменника, где они могут постепенно накапливаться (внутренняя циркуляция);

4. Ртуть Hg: металл или его соединения крайне летучи:

- ртуть и соединения ртути свободно выходят из печи и теплообменника и только частично адсорбируются сырьевой смесью в зависимости от температуры дымовых газов.

Металлы, внедренные в процесс обжига через сырьевые материалы и топливо, могут испаряться полностью или частично в теплообменнике и/или в печи в зависимости от их летучести, взаимодействия с соединениями, присутствующими в газовой фазе, и конденсироваться на клинкере, подаваемом в холодильник. Металлы из топлива первоначально поступают в дымовые газы, но выбрасываются вместе с ними из печи в очень малом количестве благодаря удерживающей способности печи и теплообменника.

Нелетучие металлы и их соединения остаются в процессе и выходят из печи в составе клинкера (более 99,9 % от всего их количества). Соединения полулетучих металлов частично переходят в газовую фазу при температуре обжига, а затем конденсируются на сырьевом материале в холодной части печи. Это приводит к циркуляции металла в печной системе (внутренние циклы), циркуляция металла может происходить только в печи и теплообменника или также охватывать установки сухого помола сырья. Если металлы в значительной степени конденсируются в теплообменнике, они буду

возвращаться в печь вместе с материалом. Это приводит к внутренней циркуляции металла (цикл печь/теплообменник).

Летучие металлы и их соединения конденсируются на частицах сырьевых материалов при низкой температуре и потенциально образуют внутренний или наружный циклы кругооборота, если не выбрасываются с выходящим из печи дымовыми газами. Таллий, ртуть и их соединения легко переходят в газовую фазу. Они не связываются в достаточной мере в состав портландцементного клинкера. Таллий и его соединения конденсируются в верхней зоне теплообменника в температурном интервале 450 – 500 °С. Таким образом, большая часть таллия, привнесенная в печную систему, остается в теплообменнике. Как следствие этого формируется внутренний или внешний цикл кругооборота металла между теплообменником, зоной сушки сырьевых материалов и системой очистки отходящих газов. Уровень выбросов таллия зависит от его концентрации во внешнем цикле и эффективности работы системы пылеосаждения.

Менее распространенные кадмий, свинец, селен и их соединения также легко переходят в газовую фазу. Образуется внутренний цикл кругооборота высоколетучих металлов, в котором они реагируют с разложившимся при обжиге материалом или осаждаются на материале, поступающем в холодную часть зоны кальцинации, в теплообменнике или в сушильном отделении.

Пыль от производства цемента содержит небольшое количество металлов и их соединений, таких, как мышьяк As, кадмий Cd, ртуть Hg, свинец Pb, таллий Tl, цинк Zn. Главными источниками богатой металлами пыли является печная система с теплообменником и декарбонизатором, вращающаяся печь и клинкерный холодильник. Использование угля и топливных отходов могут увеличивать поступление металлов в технологический процесс. Поскольку металлы, поступающие в печную систему, различаются по летучести, при высокой температуре нагретых газов в цементной печи металлические соединения находятся также в газовой фазе.

*Ртуть* занимает особое положение среди металлов благодаря своей высокой летучести.

Ртуть и ее соединения очень легко переходят в газообразное состояние (высокая летучесть металла). Это токсичный элемент и загрязнения ртутью являются глобальными, поэтому выбросы ртути в атмосферный воздух со стороны предприятий необходимо снижать. Для снижения выбросов ртути необходимо ограничивать ее введение в печную систему с сырьевыми материалами и топливом.

#### **6.4.8 Хлорид и фторид водорода**

Хлориды и фториды являются малыми дополнительными компонентами при производстве цемента. Они могут попасть в печную систему различными путями – как через сырьевые материалы, так и через топливо. Для контроля содержания этих веществ необходимо осуществлять регулярный периодический мониторинг.

В процессе обжига хлориды и фториды взаимодействуют со щелочными компонентами сырьевой смеси (Ca, Na, K и др.) с образованием легкоплавких и летучих соединений. Благодаря своей высокой летучести щелочные хлориды и фториды возгоняются (испаряются) в горячих зонах печи (декарбонизации, твердофазовых реакций, спекания) и потоком дымовых газов уносятся в более холодные зоны, где при температурах 600 – 900 °С вновь переходят в твердое состояние (конденсируются), оседают на поверхности частиц сырьевой смеси и пыли и вновь направляются в более горячие зоны печи. В результате внутри печи и частично циклонного теплообменника образуется устойчивый кругооборот щелочных соединений хлора и фтора, что приводит к многократному локальному повышению концентрации этих соединений. В присутствии значительного количества легкоплавких щелочных соединений хлора и фтора наблюдается неконтролируемое налипание обжигаемого материала на стенки циклонов, газоходов, футеровку печи, что приводит к нарушению газодинамического режима работы печного агрегата. Кроме того, увеличивается концентрация соединений хлора и фтора в клинкере и безвозвратном пылеуносе.

Для разрыва циклического кругооборота легкоплавких соединений хлора и фтора в печи используется система байпасирования печных газов. Принцип работы системы байпаса заключается в отборе из соответствующей зоны печи или теплообменника небольшого количества (5–15 об. %) дымовых газов с температурой 900 – 1000 °С, содержащих соединения хлора и фтора в газообразном состоянии, с последующим резким охлаждением этих газов до 400 – 550 °С путем разбавления воздухом или впрыском воды; при этом газообразные соединения хлора и фтора конденсируются на поверхности пылевидных частиц в газовом потоке с последующим улавливанием этих частиц в циклоне или рукавном фильтре. Обеспыленные дымовые газы с температурой до 400 – 500 °С возвращаются в печную систему, а пыль с осевшими на ней соединениями хлора и фтора направляется в отвал или утилизируется путем использования в качестве вспомогательного



компонента при помеле портландцемента. Благодаря разрыву циклического кругооборота концентрация соединений хлора и фтора в печи постепенно снижается до допустимого предела.

#### **6.4.9 Аммиак**

Выбросы аммиака ( $\text{NH}_3$ ) происходят на начальных процесса обжига клинкера из сырьевых материалов. Дополнительно  $\text{NH}_3$  может появиться при нарушении технологии, такой, как селективное некаталитическое восстановление оксидов азота, при которой выделяется непрореагировавший аммиак. Регулярный контроль выбросов  $\text{NH}_3$  является необходимым.

#### **6.4.10 Бензол, толуол, этилбензол и ксилол**

Измерения этих веществ могут быть затребованы при случае, когда деятельность предприятия происходит в специальных условиях.

Выбросы бензола в малых количествах вызываются органическими компонентами природных сырьевых материалов (остатки организмов и растений, включенные в камень в период геологического формирования месторождения) при их подаче в печь.

#### **6.4.11 Полиароматические углеводороды**

Измерения концентраций этих веществ могут потребоваться в специальных случаях при определенных условиях эксплуатации.

#### **6.4.12 Другие органические загрязняющие вещества**

Другими органическими соединениями, появляющимися в цементном производстве, являются хлорбензолы, полихлорированные бифенилы, включающие копланарные гомологи, и хлорнафталины.

Измерения этих веществ могут потребоваться в специальных случаях при определенных условиях эксплуатации.

#### **6.4.13 Влияние отходов на выбросы в окружающую среду и энергетическую эффективность при производстве цемента**

##### *Влияние на выбросы*

Использование пригодных отходов оказывает небольшое влияние на выбросы металлов в процессе обжига клинкера благодаря высокой удерживающей способности материала в теплообменнике и пылеуловителе. Следует отметить, что место питания топливом печи (точка питания) может влиять на выбросы (см. раздел 5.1.3).

Нелетучие металлы захватываются клинкерной матрицей и выводятся из печи совместно с клинкером.

Полулетучие металлы, такие как Pb и Cd, образуют стабильные циклы кругооборота в печи. Эти элементы выходят из цикла и в большом количестве и захватываются либо клинкером, либо пылью.

Особая ситуация наблюдается для Hg и Tl в связи с их летучестью. Специфические температуры процессов в сочетании с высокой летучестью приводят к неэффективному удалению металлов и установке связей между подачей материалов и выбросами в трубе.

В зависимости от температуры отходящих газов, ртуть присутствует в исходных частицах и/или в виде паров в пылеуловителе. Поэтому для контроля выбросов ртути и выбросов летучих металлов необходимо ограничить их поступление в печь. При сжигании топливных отходов требуется осуществлять постоянный анализ для контроля содержания в них летучих металлов. Выбросы газов, содержащих  $\text{NO}_x$ , HCl, HF, не зависят от выбранного сырья.

При использовании подходящей точки питания печи, применение отходов в цементном производстве не оказывает значительного влияния на выбросы. То же самое относится к выбросам  $\text{SO}_2$ , CO и общих органических соединений. Подача летучих соединений серы или органических соединений через питание сырьевой смесью не увеличивает выбросы при использовании отходов. Образовавшийся  $\text{SO}_2$  связывается клинкером во вращающейся печи или в декарбонизаторе без применения дополнительных мероприятий.

Условия горения во вращающейся печи обеспечивают низкую концентрацию выбросов полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов. Отходы, содержащие высокие концентрации органических веществ, которые могут являться прекурсорами данных соединений (например, нефть со следами фенола и хлора), должны подаваться через главную систему обжига чтобы обеспечить их надежное разложение. Если имеется сомнение в выборе точки питания в

конкретном случае, соответствующие измерения без и с использованием отходов должны быть выполнены.

#### *Влияние на энергоэффективность производства цемента*

Потребности тепловой энергии могут увеличиться, когда используются топливные отходы с высокой влажностью, грубые или с низкой реакционной способностью в сравнении с тонкодисперсным измельченным высушенным топливом с высокой калорийностью. Более низкая энергетическая эффективность также приводит к высоким выбросам и загрязнениям воздуха, увеличивая объем проходящих газов.

### **6.5 Образование отходов**

Отходы, образующиеся в результате производства цемента, представляют собой:

- крупные куски сырьевых материалов, появляющиеся в процессе приготовления сырьевой смеси;
- твердые частицы из байпасной системы и системы пылеосаждения;
- фильтрат после фильтрпресса, используемого в полумокром способе, содержащий довольно много щелочей и суспендированное твердое вещество;
- твердые частицы после прохождения газов через пылеочистные установки;
- использованные сорбционные вещества (гранулированный известняк, пыль известняка), используемые в системах очистки газов;
- отходы упаковки (пластик, древесина, металл, бумага и т.д.), образующиеся в упаковочном отделении.

Часть отходов может возвращаться и повторно использоваться на цементном заводе с учетом требований процесса и конкретной продукции. Материалы, которые нельзя возвращать в производственный процесс, передаются для использования в других отраслях промышленности или для обезвреживания/захоронения отходов.

### **6.6 Сброс в водные объекты**

В основном цементная промышленность не имеет производственных сточных вод. В цементном производстве сухого или полусухого способа вода используется в небольшом количестве только для процесса очистки.

В полумокром способе шлам обезвреживается в фильтрпрессах. В мокром способе вода используется для помола сырьевых материалов для получения шлама. Используемые сырьевые материалы часто имеют высокую влажность. Шлам или используется для питания печи, где вода испаряется, или вначале направляется на сушку. Вода, которая иногда используется для охлаждения клинкера, непосредственно испаряется в процессе охлаждения при высокой температуре клинкера.

### **6.7 Источники шума**

Шум генерируется во всем цементном производстве, начиная от приготовления сырьевых материалов, сырьевой смеси, в процессе обжига, получения цемента и заканчивая складированием цемента и его отправкой. Тяжелые машины и большие вентиляторы, используемые в различных пределах цементного производства, имеют высокий уровень шума и создают вибрацию, особенно от следующих машин и операций:

- желоба и хопперы;
- любые операции, включающие фракционирование, дробление, измельчение, грохочение сырьевых материалов, топлива, клинкера и цемента;
- дымососы;
- вентиляторы;
- сепараторы и др.

Природные звукозащитные барьеры, такие, как строения, стены, деревья или кустарники используются в цементной промышленности в целях снижения уровня шума. Если жилая зона находится близко к заводу, планирование строительства новых зданий на промплощадке увязывается с необходимостью снижения уровня шума.

### **6.8 Контроль параметров и выбросов, мониторинг**

При контроле процесса обжига клинкера рекомендуется осуществлять постоянное измерение следующих параметров:

- давление;

- температура;
- содержание O<sub>2</sub>;
- NO<sub>x</sub>;
- CO и особенно при высокой концентрации SO<sub>2</sub>;
- SO<sub>2</sub> (создана техника для оптимизации CO с NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub>).

Для определения точного количества выбросов рекомендуется производить непрерывные, постоянные измерения следующих параметров (может появиться необходимость их повторных измерений, если измеренный уровень изменился в сравнении с контрольной точкой):

- объем выбросов дымовых газов (может быть рассчитан);
- влажность (может быть рассчитана);
- температура;
- твердые частицы;
- O<sub>2</sub>;
- NO<sub>x</sub>;
- SO<sub>2</sub>;
- CO.

Регулярный периодический мониторинг выполняется для следующих веществ:

- металлы и их соединения;
- общие органические соединения;
- HCl;
- HF;
- NH<sub>3</sub>;
- ПХДД и ДБФ.

Измерения следующих веществ необходимо осуществлять при необходимости при специальных условиях деятельности:

- бензол, толуол, ксилол;
- полиароматические углеводороды;
- другие органические загрязнители (например, хлорбензол, полихлорированные бифенилы), хлорнафталин и др).

Особенно важно замерять выбросы металлов, когда отходы, содержащие летучие металлы, используются как сырьевые материалы или топливо.

Если отходы используются в цементной печи, особенно в случае использования промышленных шламов, в отходящих газах цементных печей часто (в некоторых случаях постоянно) контролируются общие органические вещества и ртуть дополнительно к регулярному постоянному контролю выбросов твердых частиц, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> и CO.

## 7 Наилучшие доступные технические методы для цементной промышленности

Технические решения и связанные с ними выбросы вредных веществ и уровни (или диапазон уровней) ресурсо- и энергопотребления, представленные в этом разделе, оценены путем повторяющихся процессов, включающих:

- идентификация основных источников воздействия на окружающую среду по данной отрасли производства; для производства цемента – это использование энергии, включая использование отходов как топлива и выбросы в атмосферный воздух;
- анализ наиболее целесообразных технических решений, связанных с источниками воздействия на окружающую среду;
- выявление лучших уровней защиты окружающей среды на базе имеющихся данных Европейского Сообщества и во всем мире;
- исследование условий, при которых достигаются указанные уровни: стоимость, перекрестные эффекты, основные движущие силы, вовлекаемые в выполнение технических решений;
- отбор наилучших доступных технических методов (НДТМ) и связанных с ними воздействий на окружающую среду и/или уровней ресурсо- и энергопотребления для отрасли.

Уровни воздействия на окружающую среду и уровни ресурсо- и энергопотребления следует понимать как показатели, которые могут быть достигнуты при применении НДТМ с учетом стоимости реализации этих технологий. Уровни воздействия на окружающую среду и уровни ресурсо- и энергопотребления не могут рассматриваться сами по себе, без учета других факторов. В некоторых

случаях технически возможно достигнуть лучших показателей по выбросам или потреблению, но из-за стоимости или перекрестных эффектов они не рассматриваются как присущие НДТМ для отрасли в целом. Однако такие уровни могут приниматься во внимание в специальных случаях, если имеются специальные условия для их применения.

НДТМ и уровни воздействия на окружающую среду и уровни ресурсо- и энергопотребления, представленные в настоящем разделе, являются «общими», присущими отрасли в целом. Они являются «реперными точками», относительно которых производится оценка существующего оборудования/технологии или принимается решение о строительстве/модернизации нового.

НДТМ являются усредненной информацией для руководства промышленности, государства и общественности по достижимым выбросам и уровню потребления при использовании специальных технических решений.

### 7.1 Общие наилучшие доступные технические методы для производства цемента

**НДТМ 1.** Разработка, внедрение и сертификация системы менеджмента окружающей среды (СМОС) (см. А.1 приложения А).

**НДТМ 2.** Снижение уровня шума в процессе производства цемента часто можно достигнуть непосредственным применением технических решений, направленных на изоляцию источников шума (см. А.2 приложения А). Такими источниками являются добыча сырья и его переработка, получение клинкера и цемента, установки дробления, помола и приготовления сырья, цементные печи, мельницы для помола цемента, ленточные конвейеры, фильтры, холодильники.

### 7.2 Общие первичные наилучшие доступные технические методы

**НДТМ 3.** Достижение ровного и стабильного процесса обжига в печи в соответствии с установленными параметрами в целях сокращения выбросов из печи и эффективного использования энергии:

	Технология
a	Оптимизация управления технологическим процессом, включая компьютерное автоматическое управление
b	Использование современных гравиметрических систем подачи твердого топлива

**НДТМ 4.** Осуществление тщательного отбора и контроля всех веществ, поступающих в печь, в целях предотвращения и/или снижения количества выбросов.

**НДТМ 5.** Осуществление на постоянной основе мониторинга и проведение измерений параметров процесса и выбросов:

	Технология	Применимость
a	Непрерывное измерение параметров процесса, демонстрирующих стабильность процесса, таких как температура, содержание O <sub>2</sub> , давление и расход	Общая применимость
b	Мониторинг и стабилизация критических параметров процесса, т.е. однородной смеси сырья и подачи топлива, регулярной дозировки и избытка кислорода	Общая применимость
c	Непрерывные измерения выбросов NH <sub>3</sub> при применении высокоэффективной технологии селективного некаталитического восстановления	Общая применимость
d	Непрерывное измерение выбросов твердых частиц, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> и CO	Применимо к печным процессам
e	Периодические измерения выбросов ПХДД/Ф и металлов	
f	Постоянные или периодические измерения выбросов HCl, HF и общих органических соединений	
g	Непрерывное или периодическое измерение запыленности	Применимо к работам, не связанным с обжигом. Частота проведения измерений или проверок производительности должна основываться на системе управления техническим обслуживанием

### 7.3 Наилучшие доступные технические методы, направленные на выбор процесса и снижение потребления энергии

**НДТМ 6.** Применение печей сухого способа с многостадийным теплообменником и декарбонизатором:

Процесс	Единица	Уровни энергопотребления <sup>(1)</sup>
Сухой процесс с многоступенчатым предварительным нагревом и предварительным обжигом	МДж/тонна клинкера	2 900 – 3 300 <sup>(2) (3)</sup>

<sup>(1)</sup> Уровни не применяются к заводам, производящим специальный цемент или белый цементный клинкер, которые требуют значительно более высоких технологических температур из-за технических характеристик продукта.

<sup>(2)</sup> При нормальных (исключая, например, запуски и остановки) и оптимизированных условиях эксплуатации.

<sup>(3)</sup> Производственная мощность влияет на потребность в энергии, при этом более высокие мощности обеспечивают экономию энергии, а меньшие мощности требуют больше энергии. Потребление энергии также зависит от количества ступеней циклонного подогревателя, при этом большее количество ступеней циклонного подогревателя приводит к снижению энергопотребления процесса обжига. Соответствующее количество ступеней циклонного подогревателя в основном определяется содержанием влаги в сырье.

**НДТМ 7.** Применение комбинации технических решений в целях снижения/минимизации потребления тепловой энергии (см. Б.1 приложения Б).

**НДТМ 8.** Снижение содержания клинкера в цементе и цементных изделиях.

Снижение содержания клинкера в цементе и цементных изделиях может быть достигнуто путем добавления наполнителей и/или добавок, таких как доменный шлак, известняк, летучая зола и пуццолана, на стадии измельчения в соответствии с соответствующими стандартами на цемент.

**НДТМ 9.** Применение когенерационных/комбинированных теплоэлектростанций.

Использование когенерационных установок для производства пара и электроэнергии или теплоэлектроцентралей может быть применено в цементной промышленности путем рекуперации отработанного тепла из охладителя клинкера или дымовых газов печи с использованием традиционных процессов парового цикла или других методов. Кроме того, избыточное тепло может быть рекуперировано из охладителя клинкера или дымовых газов печи для централизованного теплоснабжения или промышленного применения.

**НДТМ 10.** Применение одной или комбинации следующих технологий:

	Технология
a	Использование систем управления питанием
b	Использование шлифовального оборудования и другого электрического оборудования с высокой энергоэффективностью
c	Использование усовершенствованных систем мониторинга
d	Уменьшение утечек воздуха в систему
e	Оптимизация управления технологическим процессом

### 7.4 Наилучшие доступные технические методы использования отходов

**НДТМ 11.** Замена первичного сырья и/или ископаемого топлива в производстве цемента различными видами отходов, что будет способствовать экономии природных ресурсов.

Для того, чтобы гарантировать характеристики отходов, которые будут использоваться в качестве топлива и/или сырья в цементной печи, и сократить выбросы, применяются следующие методы:

	Технология
a	Использование системы контроля качества, чтобы гарантировать характеристики отходов и анализировать любые отходы, которые будут использоваться в качестве сырья и/или топлива в цементной печи: I. стабильное качество; II. физические критерии, например, образование выбросов, крупность, реакционная способность, сгораемость, теплотворная способность III. химические критерии, например, содержание хлора, серы, щелочей и фосфатов, а также содержание соответствующих металлов
b	Контроль количества соответствующих параметров для любых отходов, которые будут

	использоваться в качестве сырья и/или топлива в цементной печи, таких как хлор, соответствующие металлы (например, кадмий, ртуть, таллий), сера, общее содержание галогенов
c	Применение системы обеспечения качества для каждой партии отходов

**НДТМ 12.** Обеспечение надлежащей обработки отходов, используемых в качестве топлива и/или сырья в печи:

Технология	
a	Использование соответствующих точек для подачи отходов в печь с точки зрения температуры и времени пребывания в зависимости от конструкции печи и ее эксплуатации
b	Для подачи отходов, содержащих органические компоненты, которые могут улетучиваться перед зоной обжига, в зоны с достаточно высокой температурой печной системы
c	Работать таким образом, чтобы газ, образующийся при совместном сжигании отходов, поднимался контролируемым и однородным образом, даже при самых неблагоприятных условиях, до температуры 850 °С в течение 2 сек
d	Повысить температуру до 1100 °С, если опасные отходы с содержанием более 1% галогенированных органических веществ, выраженных в виде хлора, подвергаются совместному сжиганию
e	Непрерывная подача отходов
f	Отложить или прекратить совместное сжигание отходов для таких операций, как пуск и/или остановка, когда надлежащие температуры и время пребывания не могут быть достигнуты, как указано в пунктах a) - d) выше

**НДТМ 13.** Применение системы безопасного хранения, обработки и подачи опасных отходов, например, с использованием подхода, основанного на оценке рисков, в зависимости от источника и типа отходов, для маркировки, проверки, отбора проб и испытаний отходов, подлежащих обращению.

**7.5 Наилучшие доступные технические методы, направленные на минимизацию выбросов твердых частиц**

**НДТМ 14.** Минимизация/предотвращение неорганизованных выбросов твердых частиц при осуществлении операций (см. В.1 приложения В).

**НДТМ 15.** Минимизация/предотвращение неорганизованных выбросов твердых частиц при складировании материалов навалом (см. В.2 приложения В).

**НДТМ 16.** Использование сухой очистки организованных выбросов твердых частиц с помощью фильтра (см. В.3 приложения В).

В целях сокращения организованных выбросов твердых частиц организации необходимо применять систему управления техническим обслуживанием, в которой особое внимание уделяется характеристикам фильтров, применяемых на пыльных операциях, за исключением процессов обжига в печи, охлаждения и основного измельчения.

Сюда входят такие процессы, как дробление сырья; сырьевые конвейеры и элеваторы; складирование сырья, клинкера и цемента; хранение топлива и отгрузка цемента.

НДТМ для организованных выбросов твердых частиц от пыльных операций (за исключением обжига в печи, охлаждения и основных процессов измельчения) составляет < 10 мг/Нм<sup>3</sup>.

**НДТМ 17.** В целях снижения выбросов твердых частиц из организованных источников от процесса обжига печи НДТМ заключается в использовании сухой очистки выбросов с помощью фильтра.

Тип фильтра	Применимость
Электрофильтры	Применимо ко всем печным системам
Тканевые фильтры	
Гибридные фильтры	

НДТМ для организованных выбросов твердых частиц от процесса обжига в печи составляет <10 – 20 мг/Нм<sup>3</sup> как среднесуточное значение. При применении тканевых фильтров или новых/модернизированных электрофильтров достигается более низкий уровень.

**НДТМ 18.** Для снижения выбросов твердых частиц из организованных источников от процессов охлаждения и измельчения НДТМ заключается в использовании сухой очистки выбросов с помощью фильтра.

Тип фильтра	Применимость
Электрофильтры	Обычно применяется для охладителей клинкера и цементных мельниц
Тканевые фильтры	Обычно применимо к клинкерным охладителям и мельницам
Гибридные фильтры	Применимо к клинкерным охладителям и цементным мельницам

НДТМ для организованных выбросов твердых частиц от процессов охлаждения и измельчения составляет  $<10 - 20 \text{ мг/Нм}^3$  как среднесуточное значение. При применении тканевых фильтров или новых/ модернизированных электрофильтров достигается более низкий уровень.

### 7.6 Наилучшие доступные технические методы, направленные на минимизацию выбросов газообразных соединений

**НДТМ 19.** Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  в отходящих печных газах.

Применение одной или комбинации следующих технологий:

	Технология <sup>1)</sup>	Применимость
a	Основные методы	
	I. Охлаждение пламени	Применимо ко всем типам печей, используемых для производства цемента. Степень применимости может быть ограничена требованиями к качеству продукции и потенциальным воздействием на стабильность процесса.
	II. Горелки с низким $\text{NO}_x$	Применимо ко всем вращающимся печам, как в основной печи, так и в печи предварительного обжига.
	III. Промежуточный обжиг в печи	Обычно применимо к длинным вращающимся печам.
	IV. Добавление минерализаторов для улучшения обжиговой способности сырой муки (минерализованный клинкер)	Обычно применимо к вращающимся печам с учетом требований к качеству готовой продукции.
	V. Оптимизация процесса	Обычно применимо ко всем печам
b	Поэтапное сжигание (обычное или отработанное топливо), в том числе в сочетании с печью предварительного обжига и использованием оптимизированной топливной смеси.	Может применяться только в печах, оборудованных предварительным декарбонизатором. В системах циклонного подогревателя без предварительного декарбонизатора необходимы существенные модификации установки. В печах без печи предварительного обжига сжигание кускового топлива может оказать положительное влияние на снижение выбросов $\text{NO}_x$ в зависимости от способности создавать контролируемую восстановительную атмосферу и контролировать соответствующие выбросы $\text{CO}$ .
c	Селективное некаталитическое восстановление (SNCR)	Применимо к вращающимся цементным печам. Зоны впрыска различаются в зависимости от типа печи. В печах с длительным мокрым и длительным сухим процессом может быть сложно получить нужную температуру и необходимое время выдержки. См. также НДТМ 20.
d	Селективное каталитическое восстановление (SCR)	Применимость зависит от соответствующего катализатора и разработки процесса в цементной промышленности.

<sup>1)</sup> Описание методов приведено в Г.1 приложения Г

**НДТМ 20.** Достижение эффективного снижения выбросов  $\text{NO}_x$  при максимально низком уровне выбросов аммиака при использовании селективного некаталитического восстановления.

Применяют следующие технологии:

	Технология
a	Обеспечение надлежащей и достаточной эффективности снижения выбросов $\text{NO}_x$ наряду со стабильным рабочим процессом
b	Применение хорошего стехиометрического распределения аммиака для достижения

	максимальной эффективности снижения NO <sub>x</sub> и уменьшения NH <sub>3</sub>
c	Свести выбросы NH <sub>3</sub> (из-за непрореагировавшего аммиака) из дымовых газов на как можно более низком уровне, принимая во внимание корреляцию между эффективностью снижения выбросов NO <sub>x</sub> и выбросами NH <sub>3</sub> .

SNCR обычно применим к вращающимся цементным печам. Зоны впрыска различаются в зависимости от типа печи. В печах с длительным мокрым и длительным сухим процессом может быть сложно получить нужную температуру и необходимое время выдержки. См. также НДТМ 19.

**НДТМ 21.** Снижение/минимизация выбросов SO<sub>x</sub> из дымовых газов процессов обжига и/или предварительного нагрева/предварительного обжига.

Применение одной из следующих технологий:

	Технология <sup>1)</sup>	Применимость
a	Абсорбирующая добавка	Добавление абсорбента, в принципе, применимо ко всем печным системам, хотя в основном оно используется в суспензионных подогревателях. Добавление извести в загрузку печи снижает качество гранул/узлов и вызывает проблемы с потоком в печах Lepol. Было обнаружено, что для печей с подогревателем прямой ввод гашеной извести в дымовые газы менее эффективен, чем добавление гашеной извести в сырье печи
b	Мокрый скруббер	Применимо ко всем типам цементных печей с соответствующими (достаточными) уровнями SO <sub>2</sub> для производства гипса

<sup>1)</sup> Описание методов приведено в Г.2 приложения Г

В зависимости от сырья и качества топлива уровни выбросов SO<sub>x</sub> можно поддерживать на низком уровне, не прибегая к использованию методов снижения выбросов.

При необходимости для сокращения выбросов SO<sub>x</sub> можно использовать первичные методы и/или методы снижения выбросов, такие как добавление абсорбента или мокрый скруббер.

**НДТМ 22.** Оптимизация процессов измельчения сырья с целью сокращения выбросов SO<sub>2</sub> из печи.

Этого можно достичь, корректируя такие факторы, как:

- влажность сырья;
- температура мельницы;
- время выдержки в мельнице;
- тонкость измельченного материала.

Применимо, если процесс сухого помола используется в комбинированном режиме.

**НДТМ 23.** Минимизация частоты проскоков CO и поддержание их общей длительности менее 30 минут в год при применении электрофильтров или гибридных фильтров.

Применяют следующие методы в сочетании:

	Технология
a	Снижение времени простоя электрофильтра
b	Непрерывные автоматические измерения концентрации CO. Использование оборудования для быстрого измерения и контроля, включая систему контроля CO с коротким временем отклика, расположенную вблизи источника CO

По соображениям безопасности из-за риска взрыва электрофильтра их необходимо отключать при повышении уровня CO в дымовых газах. Следующие методы предотвращают отключения CO и, следовательно, сокращают время отключения электрофильтра:

- контроль процесса горения;
- контроль органической нагрузки сырья;
- контроль качества топлива и системы подачи топлива.

**НДТМ 24.** Избегать подачи сырья с высоким содержанием летучих органических соединений (ЛОС) в печную систему по пути подачи сырья.

**НДТМ 25.** Предотвращение/сокращение выбросов хлористого водорода (HCl) из дымовых газов процессов обжига в печи.

Применение одной или комбинации следующих технологий:



Технология	
a	Использование сырья и топлива с низким содержанием хлора
b	Ограничение содержания хлора в любых отходах, которые будут использоваться в качестве сырья и/или топлива в цементной печи

НДТМ для выбросов хлористого водорода (HCl) составляет <10 мг/Нм<sup>3</sup>.

**НДТМ 26.** Предотвращение/сокращение выбросов фторида водорода (HF) из дымовых газов процессов обжига в печи.

Применение одной или комбинации следующих технологий:

Технология	
a	Использование сырья и топлива с низким содержанием фтора
b	Ограничение содержания фтора в любых отходах, которые будут использоваться в качестве сырья и/или топлива в цементной печи

НДТМ для выбросов фторида водорода (HF) составляет <1 мг/Нм<sup>3</sup>.

**НДТМ 27.** Предотвращение выбросов ПХДД/Ф или поддержание низких уровней выбросов ПХДД/Ф из дымовых газов в процессах обжига в печи.

Применение одной или комбинации следующих технологий:

	Технология	Применимость
a	Тщательный выбор и контроль входящих в печь материалов (сырья), например, хлора, меди и летучих органических соединений	Обычно применимо
b	Тщательный выбор и контроль сырья для печи (топлива), например, хлора и меди	Обычно применимо
c	Ограничение/избегание использования отходов, содержащих хлорированные органические материалы	Обычно применимо
d	Избегание подачи топлива с высоким содержанием галогенов (например, хлора) при вторичном сжигании	Обычно применимо
e	Быстрое охлаждение дымовых газов печи до температуры ниже 200 °С и минимизация времени пребывания дымовых газов и содержания кислорода в зонах, где температура колеблется от 300 до 450 °С	Применимо к длинным мокрым печам и длинным сухим печам без предварительного нагрева. В современных печах подогревателя и декарбонизатора эта особенность уже присуща
f	Прекратить совместное сжигание отходов для таких операций, как запуск и/или остановка	Обычно применимо

### 7.7 Наилучшие доступные технические методы, направленные на минимизацию выбросов металлов

**НДТМ 28.** Минимизация выбросов металлов из дымовых газов процессов обжига в печи.

Применение одной или комбинации следующих технологий:

Технология	
a	Выбор материалов с низким содержанием соответствующих металлов и ограничение содержания соответствующих металлов в материалах, особенно ртути
b	Использование системы обеспечения качества, гарантирующей характеристики используемых отходов
c	Использование эффективных методов удаления твердых частиц, изложенных в НДТМ 17

### 7.8 Наилучшие доступные технические методы, направленные на минимизацию технологических потерь

**НДТМ 29.** Сокращение количества твердых отходов в процессе производства цемента наряду с экономией сырья.

Применение следующих технологий:

	Технология	Применимость
a	Повторное использование собранных твердых частиц в процессе, где это возможно	Обычно применимо, но зависит от химического состава твердых частиц

b	По возможности используйте твердые частицы в других продуктах	Использование твердых частиц в других продуктах может находиться вне контроля оператора
---	---	---

Собранные твердые частицы можно по возможности повторно использовать в производственных процессах. Такая рециркуляция может происходить непосредственно в печи или в загрузочном материале печи (ограничивающим фактором является содержание щелочного металла) или путем смешивания с готовой цементной продукцией. Контроль качества может потребоваться, когда собранные твердые частицы возвращают в производственные процессы. Для материалов, которые не подлежат вторичной переработке, могут быть найдены альтернативные применения (например, добавка для десульфурации дымовых газов на установках сжигания).

## Приложение А (справочное)

### Краткое описание общих наилучших доступных технических методов для производства цемента

#### **А.1. Разработка, внедрение и сертификация системы менеджмента окружающей среды (СМОС)**

Система менеджмента окружающей среды должна соответствовать требованиям СТБ ISO 14001 и включать в себя все следующие функции:

- i. приверженность руководства, включая высшее руководство;
- ii. принятие высшим руководством экологической политики, которая включает требование постоянного улучшения (экологической результативности) установок;
- iii. планирование и внедрение необходимых процедур, целей и задач с учетом финансовых планов и инвестиций;
- iv. внедрение мероприятий с уделением особого внимания:
  - (a) структура и распределение ответственности;
  - (b) обучение, осведомленность и компетентность (персонала);
  - (c) коммуникации;
  - (d) вовлечение в процесс развития СМОС всех сотрудников;
  - (e) документирование;
  - (f) эффективный процессный контроль;
  - (g) программа технического обслуживания;
  - (h) готовности к нештатным ситуациям и авариям;
  - (i) гарантии обязательного соблюдения требований природоохранного законодательства.
- v. проведение проверки и корректирующих мероприятий, с особым вниманием к таким позициям, как:
  - (a) мониторинг и проведение измерений [6];
  - (b) корректирующие и предупреждающие действия;
  - (c) ведение записей;
  - (d) независимый (где осуществимо) внутренний аудит, с целью определения соответствия СМОС заложенным изначально принципам.
- vi. проверка СМОС и ее пригодности, адекватности и эффективности высшим руководством;
- vii. разработка более чистых технологий;
- viii. учет воздействия на окружающую среду в результате возможного вывода установки из эксплуатации, на этапе проектирования новой установки и в течение всего срока ее эксплуатации;
- ix. применение отраслевого бенчмаркинга на регулярной основе.

#### **А.2. Снижение уровня шума в процессе производства цемента**

Шум появляется во всем производственном процессе, начиная с карьера до получения готовой продукции.

Чтобы снизить уровень шума и предотвратить его распространение на близлежащую территорию, на цементном заводе могут быть применены различные технические решения по снижению шума:

- ограждение шумящих установок;
- изоляция вибрирующих установок;
- использование внутренней и наружной обшивки, сделанной из стойкого материала для лотков, желобов;
- строения для прикрытия эксплуатационного оборудования, перерабатывающего материалы;
- возведение стен, защищающих от шума;
- глушитель на выпускном отверстии для дымовой трубы;
- звукоизоляция изоляция каналов, труб и воздуходувок, которые находятся в шумонепроницаемом здании.

Если вышеупомянутые технические решения не могут быть применены и если установки, выделяющие шум, невозможно перевести в отдельные здания, например, из-за размера печей и их средств обслуживания, применяются вторичные технические решения. Например, осуществлять возведение построек или посадку природных барьеров, таких как растущие деревья и кустарников

между защищаемой зоной и источником активного шума, например, печь или площадь склада. Двери и окна защищаемого пространства необходимо плотно закрывать в период эксплуатации шумовыделяющих установок.

Технические решения для снижения уровня шума, возникающего в процессе производства цемента, представлены в таблице А.2.1.

**Таблица А.2.1 - Технические решения для снижения уровня шума**

№ п/п	Техническое решение
1	Выбор подходящего места для шумных операций
2	Ограждение шумных операций/агрегатов
3	Виброизоляция производств/агрегатов
4	Использование внутренней и внешней изоляции на основе звукоизолирующих материалов
5	Звукоизоляция зданий для укрытия любых шумопроизводящих операций, связанных с оборудованием для переработки материалов
6	Установка звукозащитных стен и/или естественных шумозащитных барьеров (природных барьеров)
7	Применение глушителей на отводящих трубах
8	Звукоизоляция каналов и вентиляторов, находящихся в звукоизолированных зданиях
9	Закрытие дверей и окон в крытых помещениях
10	Использование звукоизоляции машинных помещений
11	Использование звукоизоляции стенных проемов, например, установка шлюза в месте ввода ленточного конвейера
12	Установление звукопоглотителей в местах выхода воздуха, например, на выходе чистого газа пылеулавливающих установок
13	Уменьшение скорости потока в воздуховодах
14	Использование звукоизоляции водзуховодов
15	Сепарация шумовых источников и потенциально резонансных компонентов, например компрессоров и водзуховодов
16	Использование глушителей для вентиляторов с фильтрами
17	Использование звукоизолирующих модулей в технических устройствах (например, компрессорах)
18	Использование резиновых щитков при дроблении (для предотвращения контакта металла с металлом)
19	Возведение построек или посадка деревьев и кустов между защитной полосой и шумным производством

## Приложение Б (справочное)

### Краткое описание наилучших доступных технических методов, направленных на выбор процесса и снижение потребления энергии

#### Б.1. Применение комбинации технических решений в целях снижения/минимизации потребления тепловой энергии

	Технология	Применимость
a	<p>Применение усовершенствованных и оптимизированных систем обжига и плавный и стабильный процесс обжига, близкий к заданным значениям технологических параметров за счет применения:</p> <p>I. оптимизации процесса управления, включая компьютерные системы автоматического управления</p> <p>II. современных гравиметрических систем подачи твердого топлива</p> <p>III. предварительного нагрева и прокаливания, насколько это возможно, с учетом существующей конфигурации системы обжига</p>	<p>Общеприменимо</p> <p>Для существующих печей применимость предварительного нагрева и предварительного прокаливания зависит от конфигурации печной системы</p>
b	<p>Отвод избыточного тепла из печей, особенно из зоны их охлаждения. В частности, избыточное тепло печи из зоны охлаждения (горячий воздух) или из подогревателя может быть использовано для сушки сырья</p>	<p>Обычно применяется в цементной промышленности</p> <p>Утилизация избыточного тепла из зоны охлаждения применима при использовании колосниковых охладителей</p> <p>На роторных охладителях может быть достигнута ограниченная эффективность рекуперации</p>
c	<p>Применение соответствующего количества ступеней циклона в зависимости от характеристик и свойств используемого сырья и топлива</p>	<p>Ступени циклонного подогревателя применимы к новым установкам и крупным модернизациям</p>
d	<p>Использование топлива с характеристиками, которые положительно влияют на потребление тепловой энергии</p>	<p>Этот метод, как правило, применим к цементным печам в зависимости от наличия топлива и к существующим печам в зависимости от технических возможностей подачи топлива в печь</p>
e	<p>При замене традиционных видов топлива отходами, используя оптимизированные и подходящие системы цементных печей для сжигания отходов</p>	<p>Обычно применяется для всех типов цементных печей</p>
f	<p>Минимизация байпасных потоков</p>	<p>Обычно применяется в цементной промышленности</p>

На энергопотребление современных печных систем влияют несколько факторов, таких как свойства сырья (например, содержание влаги, горючесть), использование топлива с различными свойствами, а также использование системы байпаса. Кроме того, производственная мощность печи влияет на потребность в энергии.

**Приложение В**  
(справочное)

**Краткое описание наилучших доступных технических методов, направленных на минимизацию выбросов твердых частиц**

**В.1. Минимизация/предотвращение неорганизованных выбросов твердых частиц при осуществлении операций**

Необходимо использовать один или комбинацию следующих методов:

	Технология	Применимость
a	Использование простой и линейной планировки места установки	Применимо только к новым установкам
b	Изоляция/герметизация операций, в результате которых образуются выбросы твердых частиц (измельчение, просеивание и смешивание)	Общая применимость
c	Использование чехлов/крышек/кожухов на конвейеры и элеваторы, которые сконструированы как закрытые системы, если из запыленного материала могут выделяться неорганизованные выбросы твердых частиц	
d	Уменьшить количество потерь воздуха и мест утечек	
e	Использование автоматических устройств и систем управления	
f	Обеспечение бесперебойной работы	
g	Обеспечение надлежащего и полного технического обслуживания установки с помощью мобильной и стационарной вакуумной очистки. — Во время работ по техническому обслуживанию или в случае неисправностей в системах транспортировки может произойти утечка материалов. Для предотвращения образования неорганизованных выбросов твердых частиц во время технологической операций следует использовать вакуумные системы. Новые здания могут быть легко оборудованы стационарными трубопроводами для вакуумной очистки, в то время как существующие здания, как правило, оснащаются мобильными системами и гибкими соединениями — В особых случаях для пневмотранспортных систем может быть предпочтителен процесс циркуляции	
h	Вентиляция и сбор твердых частиц с помощью тканевых фильтров: — Насколько это возможно, все работы с материалами должны проводиться в закрытых системах, поддерживаемых под отрицательным давлением. Всасываемый воздух затем удаляется тканевым фильтром перед выбросом в атмосферный воздух	
i	Использование закрытого хранилища с автоматической системой обработки: — Силосы для клинкера и закрытые полностью автоматизированные зоны хранения сырья считаются наиболее эффективным решением проблемы неорганизованных выбросов твердых частиц, образующихся при хранении больших объемов сырья. Эти типы хранилищ оснащены одним или несколькими тканевыми фильтрами для предотвращения образования рассеянной пыли при погрузочно-разгрузочных операциях — Использование силосов для хранения достаточной вместимости, индикаторов уровня с выключателями и с фильтрами для удаления содержащего твердые частицы воздуха, вытесняемого во время операций наполнения	
j	Для процессов отгрузки и погрузки применение гибких заправочных труб, оснащенных системой пылеудаления для загрузки цемента, которые расположены по направлению к загрузочному полу грузовика	

## В.2. Минимизация/предотвращение неорганизованных выбросов твердых частиц при складировании материалов навалом

Необходимо использовать один или комбинацию следующих методов:

	Технология
a	Укрытие места для хранения сыпучих материалов или складские запасы или ограждение их сеткой, стеной или ограждением из вертикальной зелени (искусственные или естественные ветрозащитные барьеры для защиты от ветра открытых штабелей)
b	Использование защиты от ветра с открытыми штабелями: — Следует избегать складирования пылевидных материалов на открытом воздухе, но если они все же имеются, можно уменьшить рассеивание пыли с помощью правильно спроектированных ветрозащитных экранов
c	Применение водяного распыления и химических средств подавления пыли: — Когда точечный источник рассеянной пыли хорошо локализован, можно установить систему распыления воды. Увлажнение частиц пыли способствует агломерации и, таким образом, оседанию пыли. Также доступен широкий спектр средств для повышения общей эффективности распыления воды
d	Обеспечение асфальтирования и смачивания дорог, поддержание чистоты: — Площадки, используемые грузовыми автомобилями, должны быть по возможности заасфальтированы, а поверхность должна поддерживаться как можно более чистой. Увлажнение дорог может снизить диффузные выбросы пыли, особенно в сухую погоду. Их также можно чистить подметальными машинами. Необходимо использовать надлежащие методы ведения домашнего хозяйства, чтобы свести к минимуму диффузные выбросы пыли
e	Обеспечение увлажнения запасов: — Неорганизованные выбросы твердых частиц на складах могут быть уменьшены за счет достаточного увлажнения мест загрузки и выгрузки, а также за счет использования конвейерных лент с регулируемой высотой
f	Подбор высоты выгрузки в соответствии с изменяющейся высотой навала, по возможности автоматически или уменьшая скорость выгрузки, когда невозможно избежать неорганизованных выбросов твердых частиц в местах загрузки или выгрузки на складах

## В.3. Использование сухой очистки организованных выбросов твердых частиц с помощью фильтра

Тип фильтра	Описание
Электрофильтры	<p>Электрофильтры (ESP) генерируют электростатическое поле на пути твердых частиц в воздушном потоке. Частицы приобретают отрицательный заряд и мигрируют к положительно заряженным собирающим пластинам. Пластины для сбора периодически стучат или вибрируют, смещая материал, и он попадает в бункеры для сбора, расположенные ниже. Важно оптимизировать циклы встряхивания ESP, чтобы свести к минимуму повторный унос частиц и тем самым свести к минимуму возможность ухудшения видимости шлейфа.</p> <p>ESP характеризуются способностью работать в условиях высоких температур (приблизительно до 400 °C) и повышенной влажности. Основными недостатками этого метода являются его пониженная эффективность из-за изолирующего слоя и накопление материала, который может образовываться при высоких затратах хлора и серы. Для общей производительности ESP важно избегать отключений CO.</p> <p>Несмотря на отсутствие технических ограничений на применение ESP в различных процессах цементной промышленности, их не часто выбирают для обеспыливания цементных заводов из-за инвестиционных затрат и эффективности (относительно высоких выбросов) во время пусков и остановок</p>
Тканевые фильтры	<p>Тканевые фильтры являются эффективными в сборе твердых частиц. Основной принцип тканевой фильтрации заключается в использовании тканевой мембраны, проницаемой для газа, но удерживающей твердые частицы. В основном фильтрующий материал</p>

	<p>расположен геометрически. Первоначально твердые частицы оседает как на поверхностных волокнах, так и в глубине ткани, но по мере нарастания поверхностного слоя твердых частиц сам становится доминирующим фильтрующим материалом. Отходящие газы могут вытекать либо изнутри мешка наружу, либо наоборот. По мере утолщения пылевой корки сопротивление потоку газа увеличивается. Поэтому необходима периодическая очистка фильтрующего материала для контроля перепада давления газа на фильтре. Тканевый фильтр должен иметь несколько отсеков, которые можно индивидуально изолировать в случае выхода из строя мешка, и их должно быть достаточно, чтобы обеспечить адекватную производительность, если отсек будет отключен от сети. В каждом отделении должны быть «детекторы разрывных мешков», указывающие на необходимость технического обслуживания в случае возникновения таких проблем. Фильтровальные рукава доступны из различных тканых и нетканых материалов. Современные синтетические ткани могут работать при достаточно высоких температурах – до 280°C.</p> <p>На производительность тканевых фильтров в основном влияют различные параметры, такие как совместимость фильтрующего материала с характеристиками организованных выбросов и твердых частиц, подходящие свойства термической, физической и химической стойкости, такие как гидролиз, кислота, щелочь и т. д. окисление и температура процесса. При выборе технологии необходимо учитывать влажность и температуру организованных выбросов</p>
Гибридные фильтры	<p>Гибридные фильтры представляют собой комбинацию ESP и тканевых фильтров в одном устройстве. Обычно они являются результатом конверсии существующих ESP. Они позволяют частично повторно использовать старое оборудование</p>



**Приложение Г**  
(справочное)

**Краткое описание наилучших доступных технических методов, направленных на минимизацию выбросов газообразных соединений**

**Г.1. Снижение выбросов NO<sub>x</sub> в отходящих печных газах**

	Технология	Применимость
а	Основные методы/технологии	
	I. Охлаждение пламени	<p>Добавление воды в топливо или непосредственно в пламя с использованием различных методов впрыска, таких как впрыск одной жидкости (жидкости) или двух жидкостей (жидкости и сжатого воздуха или твердых веществ) или использование жидких/твердых отходов с высоким содержанием воды, снижает температуру и увеличивает концентрацию гидроксильных радикалов. Это может оказать положительное влияние на снижение NO<sub>x</sub> в зоне горения.</p>
	II. Горелки с низким NO <sub>x</sub>	<p>Конструкции горелок с низким выбросом NO<sub>x</sub> (непрямое сжигание) различаются в деталях, но, по существу, топливо и воздух впрыскиваются в печь через концентрические трубы. Доля первичного воздуха снижается примерно до 6% –10 % от количества, необходимого для стехиометрического сгорания (обычно 10 % – 15 % в традиционных горелках). Осевой воздух впрыскивается с высокой скоростью во внешний канал. Уголь может продуваться через центральную трубу или средний канал. Третий канал используется для завихрения воздуха, его завихрение создается лопастями на выходе из обжиговой трубы или позади нее. Конечным эффектом этой конструкции горелки является очень раннее воспламенение, особенно летучих соединений топлива, в атмосферном воздухе с дефицитом кислорода, и это будет способствовать снижению образования NO<sub>x</sub>.</p> <p>Применение горелок с низким содержанием NO<sub>x</sub> не всегда приводит к снижению выбросов NO<sub>x</sub>. Настройка горелки должна быть оптимизирована.</p>
	III. Промежуточный обжиг в печи	<p>В длинных мокрых и длинных сухих печах создание восстановительной зоны путем сжигания кускового топлива может снизить выбросы NO<sub>x</sub>. Поскольку в длинных печах обычно нет доступа к температурной зоне около 900 – 1000 °С, в средней печи можно установить системы обжига, чтобы можно было использовать отработанное топливо, которое не может пройти через основную горелку (например, шины).</p> <p>Скорость сгорания топлива может иметь решающее значение. Если процесс происходит слишком медленно, в зоне обжига могут возникнуть восстановительные условия, что может серьезно повлиять на качество продукта. Если он слишком высок, секция цепи печи может перегреться, что приведет к перегоранию цепей. Диапазон температур менее 1100 °С исключает использование опасных отходов с содержанием хлора более 1 %.</p>
	IV. Добавление минерализаторов для улучшения обжиговой способности сырой муки (минерализованный клинкер)	<p>Добавление в сырье минерализаторов, таких как фтор, позволяет регулировать качество клинкера и снизить температуру в зоне спекания. При уменьшении/понижении температуры горения также снижается образование NO<sub>x</sub>.</p>

	V. Оптимизация процесса	Оптимизация процесса, такая как сглаживание и оптимизация работы печи и условий обжига, оптимизация управления работой печи и/или гомогенизация подаваемого топлива, может применяться для снижения выбросов NO <sub>x</sub> . Были применены общие меры/методы первичной оптимизации, такие как меры/методы управления процессом, улучшенная техника непрямого сжигания, оптимизированные соединения охладителя и выбор топлива, а также оптимизированные уровни кислорода.
b	Поэтапное сжигание (обычное или отработанное топливо), в том числе в сочетании с печью предварительного обжига и использованием оптимизированной топливной смеси.	Поэтапное сжигание применяется в цементных печах со специально разработанной камерой предварительного обжига. Первый этап сжигания происходит во вращающейся печи при оптимальных условиях для процесса обжига клинкера. Вторая ступень горения представляет собой горелку на входе в печь, создающую восстановительную атмосферу, разлагающую часть оксидов азота, образующихся в зоне спекания. Высокая температура в этой зоне особенно благоприятна для реакции превращения NO <sub>x</sub> в элементарный азот. На третьей стадии сжигания обжиговое топливо подается в декарбонизатор с некоторым количеством третичного воздуха, создавая там также восстановительную атмосферу. Эта система снижает образование NO <sub>x</sub> из топлива, а также уменьшает выбросы NO <sub>x</sub> из печи. На четвертой и последней стадии сгорания оставшийся третичный воздух подается в систему в качестве «верхнего воздуха» для остаточного сгорания.
c	Селективное некаталитическое восстановление (SNCR)	Селективное некаталитическое восстановление (SNCR) включает впрыскивание аммиачной воды (до 25 % NH <sub>3</sub> ), соединений-предшественников аммиака или раствора мочевины в дымовые газы для восстановления NO до N <sub>2</sub> . Реакция дает оптимальный эффект в температурном диапазоне от 830 до 1050 °C, и необходимо обеспечить достаточное время удерживания, чтобы введенные агенты прореагировали с NO.
d	Селективное каталитическое восстановление (SCR)	SCR восстанавливает NO и NO <sub>2</sub> до N <sub>2</sub> с помощью NH <sub>3</sub> и катализатора в диапазоне температур около 300 – 400 °C. Этот метод широко используется для снижения выбросов NO <sub>x</sub> в других отраслях промышленности (угольные электростанции, мусоросжигательные заводы). В цементной промышленности в основном рассматриваются две системы: конфигурация с низким содержанием твердых частиц между обеспыливающим устройством и дымовой трубой и конфигурация с высоким содержанием твердых частиц между предварительным нагревателем и обеспыливающим устройством. Системы дымовых газов с низким содержанием твердых частиц требуют повторного нагрева дымовых газов после обеспыливания, что может привести к дополнительным затратам энергии и потерям давления. Системы с высоким содержанием твердых частиц считаются предпочтительными по техническим и экономическим причинам. Эти системы не требуют повторного нагрева, поскольку температура отходящих газов на выходе системы предварительного нагревателя обычно находится в температурном диапазоне, подходящем для работы SCR.

**Г.2. Снижение/минимизация выбросов SO<sub>x</sub> из дымовых газов процессов обжига и/или предварительного нагрева/предварительного обжига**

	Технология	Применимость
a	Абсорбирующая добавка	<p>Абсорбент либо добавляется в сырье (например, добавление гашеной извести), либо впрыскивается в поток газа (например, гашеная известь (Ca(OH)<sub>2</sub>), негашеная известь (CaO), активированная зола-унос с высоким содержанием CaO или бикарбонат натрия (NaHCO<sub>3</sub>)).</p> <p>Гашеную известь можно загружать в сырьевую мельницу вместе с компонентами сырья или добавлять непосредственно в сырье для печи. Добавление гашеной извести дает то преимущество, что кальцийсодержащая добавка образует продукты реакции, которые можно непосредственно включать в процесс обжига клинкера.</p> <p>Впрыск абсорбента в газовый поток может применяться в сухом или мокром виде (полусухая очистка). Абсорбент вводится в тракт дымовых газов при температуре, близкой к точке росы воды, что создает более благоприятные условия для улавливания SO<sub>2</sub>. В системах цементных печей этот диапазон температур обычно достигается в зоне между сырьевой мельницей и пылесборником.</p>
b	Мокрый скруббер	<p>Мокрый скруббер является наиболее часто используемым методом десульфурации дымовых газов на угольных электростанциях. Для процессов производства цемента мокрый процесс сокращения выбросов SO<sub>2</sub> является общепринятым методом. Влажная чистка основана на следующей химической реакции:</p> $\text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \longleftrightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ <p>SO<sub>x</sub> поглощаются жидкостью/суспензией, которая распыляется в распылительной башне. Абсорбентом обычно является карбонат кальция. Системы мокрой очистки обеспечивают самую высокую эффективность удаления растворимых кислых газов среди всех методов десульфурации дымовых газов (ДДГ) с наименьшими избыточными стехиометрическими коэффициентами и наименьшим уровнем образования твердых отходов. Этот метод требует определенного количества воды с последующей необходимостью очистки сточных вод</p>

### Библиография

- [1] Закон Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» от 26 ноября 1992 г № 1982-XII
- [2] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries  
(Справочный документ по наилучшим доступным технологиям (НДТ) для управления отходами добывающих отраслей промышленности в соответствии с Директивой 2006/21/ЕС, EUR 28963 EN, Публикационное бюро Европейского Союза, Люксембург, 2018 г.)
- [3] Закон Республики Беларусь «Об обращении с отходами» от 20 июля 2007 г. № 271-3
- [4] Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Best Available Techniques on Emissions from Storage  
(Справочный документ по наилучшим доступным методам (НДТ), касающийся наилучших доступных методов контроля выбросов при хранении)
- [5] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration  
(Справочный документ по наилучшим доступным методам (НДТ) по сжиганию отходов)
- [6] JRC Reference Report on Monitoring of Emissions to Air and Water from IED Installations  
(Справочный отчет о мониторинге выбросов в атмосферный воздух и водные объекты от промышленных установок)