

ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

3.2. Системы золошлакоудаления ТЭС

3.2.3. Шлакоудаление

3.2.3.4. Превращение шлака в летучую золу и обзор возможностей повторного использования угольной золы. Изучение результатов на примере электростанции Фюме Санто

М. Бэртолино, E.On Italia; Д. Коннола, Д. Риччи, Р. Сорренти, Magaldi Power S.p.A., Салерно, Италия

АННОТАЦИЯ

Компания Magaldi Power S.p.A. разработала и внедрила MAC — Magaldi Ash Cooler® (шлакоохладитель Магалди) – систему сухого выделения, охлаждения и обработки шлака пылеугольных котлов.

MAR – Magaldi Ash Recycling system (система Магалди по возврату шлака в топку котла) является усовершенствованием технологии MAC и предназначена для возврата шлака в топку котла с целью его превращения в летучую золу.

В данной статье описывается опыт первого промышленного применения системы MAR на пылеугольной электростанции Fiume Santo 2x320 МВт в Сардинии, Италия (владелец - E.On Italia), а также предлагается обзор возможностей вторичного использования шлака.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время экологический аспект неожиданно стал основным условием устойчивого развития большинства мировых электростанций. Высокие показатели энергопотребления и недостаток мест для безопасной утилизации твердых, жидких и газообразных отходов, генерируемых энергетическим сектором в больших объемах, стали причиной климатических изменений, потенциально опасных для жизни на планете Земля.

Сжигание органического топлива на электростанциях по всему миру является крупнейшим источником выбросов углекислого газа. Помимо электроэнергии при сжигании угля вырабатываются различные сопутствующие продукты, например, летучие золы и зольные остатки, которые неизбежны, если речь идет об угольных котлах, из-за жаропрочных минеральных веществ и некоторых топливных компонентов, сгорание которых происходит медленно и не полностью.

Международные стандарты предусматривают возможности использования угольной золы в составе цемента (EN 197-1:2000/A3:2007) или бетона (EN 450-1:2005/A1:2007). Поэтому, вместо того, чтобы рассматривать ее в качестве отхода, зола может быть полезно применена как источник годных к употреблению сопутствующих продуктов, которые эффективно повышают качество многих строительных материалов, а также оказывают значительный экономический и экологический эффект.

Для снижения воздействия на окружающую среду и возможности использования золы в цементной промышленности и производстве бетона, компания Magaldi Power S.p.A. разработала и запатентовала систему, которая выделяет шлак, охлаждает и возвращает его в топку котла.

Данная система объединяет в себе преимущества успешно проверенной в эксплуатации системы MAC – Magaldi Ash Cooler® и ее модификации MAR – Magaldi Ash Recycling, являясь, таким образом, комплексной системой шлака. Система MAC позволяет выделить, охладить и транспортировать сухой шлак факельного сжигания угля, сохраняя его в сухом виде (в качестве охлаждающего агента используется атмосферный воздух, а не вода), в то время как система MAR возвращает сухой шлак в топку котла для его превращения его в летучую золу.

Среди продуктов сжигания угля шлак является высокоэффективным средством для уменьшения углеродных следов, связанных с использованием портландцементного клинкера для производства современных цементов.

В данном докладе представлены запатентованная технология MAR и фактические ее рабочие характеристики, которые были достигнуты на электростанции Fiume Santo (владелец – E.On Italia). Также дается общий обзор возможностей вторичного использования угольных зол.

Патенты, связанные с системой:

- “Steam generating system and method for discharge of ash” («Парогенераторная система и метод золоудаления»), Международный патент № EP 471055 B1, приоритет IT 1955490 от 2 марта 1990 г.
- “Integrated system for the extraction of heavy ash, conversion thereof into light ash and reduction of unburned matter” («Комплексная система выделения плотной соды, переработки в легкую соду и сокращения несгораемых частиц»), Номер заявки PCT/EP 2005/007536, приоритет IT MI 2004 A 001371 от 9 июля 2004 г.

2. СИСТЕМА MAR: ПРОЕКТ «FIUME SANTO»

2.1. Технические характеристики котлов

В июне 2003 г. две системы MAC-Magaldi Ash Cooler® (шлакоохладитель Магалди) были успешно установлены на энергоблоках №3 и №4 электростанции Fiume Santo (владелец - E.On Italia), расположенной в экологически чистом природном районе в Северо-западной части о. Сардиния (Италия).

Сухие системы привнесли значительные преимущества, решив экологические проблемы путем отказа от использования воды при обработке зольных остатков, являясь, таким образом, самым простым и надежным способом соответствия новым ужесточенным экологическим стандартам.

Блоки №3 и №4 электростанции Fiume Santo имеют по 320 МВт номинальной мощности каждый. Котлы оснащены тангенциальными горелками, энергия для шести уровней горения подается дробилкой с угольным ковшем Raymond XRP 783, работающей под избыточным давлением.

В качестве топлива на обоих блоках используется пылеугольное топливо, также предусмотрена возможность будущей модификации котлов для совместного сжигания биомасс. Уголь, используемый в качестве топлива на данной электростанции, имеет средний уровень содержания золы (аналогичен по качеству Южноафриканскому углю) с низшей теплотворностью около 6000 ккал/кг. Суммарный объем воздуха, поступающего на сгорание, составляет около 1200 т/час.

2.2. Характеристики шлака

Плотность шлака оценивается на уровне 700 кг/м³ для рабочих расчетов и 1400 кг/м³ для прикладных расчетов, включающих дополнительный запас плотности. Гранулометрический состав шлака при обработке системой *MAR* непостоянен, меняется в зависимости от эффективности измельчения мельницей для клинкера. Предположительное гранулометрическое распределение: 10,54 % < 1,18 мм и 100 % < 5,0 мм. Максимальный выход шлака оценивается на уровне около 1,84 т/ч при максимальном расходе угля с максимальной зольностью 16 % и долей шлака, равной 0,1. В табл. 1 приведены основные характеристики угля и шлака.

Таблица 1. Характеристики угля и шлака

Максимальный расход угля на котел		т/ч	115
Уголь	Зольность	%	12,0 (средняя) 16,0 (максимум)
	Низшая теплотворность	МДж/кг	25,0
Шлак	Выход шлака	Всего золы	т/ч ~ 18,4
			% 10
			т/ч ~ 1,84 (норма)
			т/ч 6 (продувкасажи)
			т/ч 9 (проектировка)
Вальцовая угольная дробилка	Тип	-	Raymond
	Количество	-	6 (1 в резерве)
	Избыточное давление воздуха	мм вод. ст.	300 (норма)
	Расход угля	т/ч	40 (номинал)
		т/ч	32 (максимум)
т/ч		23 (норма)	
Вторично используемый шлак	Кол-во дробилок, принимающих шлак	-	4
	Расход шлака на одну дробилку	т/ч	0,46
	Рост нагрузки на дробилку	%	2,0 (норма)

2.3. Техническое описание системы *MAR*

Система *MAR*, установленная на электростанции Fiume Santo, включает следующие компоненты:

- Пневматическая конвейерная система положительного давления с базальтовыми трубопроводами. Данная установка посредством распределительного клапана наполняет приемочные резервуары, которые установлены на высоте 18 метров;
- Два приемочных резервуара, которые обеспечивают временное хранение шлака для его возврата в котел. Эти резервуары загружаются сверху посредством специального клапана. Вентиляция резервуара напрямую соединена с топкой котла на высоте 35 метров. Каждый резервуар снабжен двумя отдельными нагнетательными каналами, по одному на каждую угольную дробилку;
- Четыре вибропитателя (по два на каждый приемочный резервуар) для дозированной подачи шлака в угольные дробилки. Загрузка шлака в каждую из угольных дробилок регулируется автоматически в зависимости от частоты вращения питателя угля;
- Четыре пневматические шибберно-ножевые задвижки, устанавливаемые на выходных отверстиях каждого вибропитателя;
- Два пневматических шаровых клапана, установленных на каждом вентиляционном отверстии резервуара для обеспечения герметичности между приемочным резервуаром и топкой котла.

На рис. 1 изображена блок-схема системы возврата шлака в топку котла, установленная на электростанции Fiume Santo.

2.4. Пневматическая конвейерная система

Ранее в 2003 г. напорная пневматическая конвейерная система была установлена следом за системой пневмомеханического шлакоудаления *MAR*.

Для возврата шлака в топку котла с помощью новой конвейерной линии на существующей линии трубопровода в резервуар для летучей золы было спроектировано ответвление (рис. 1). Система логического управления имеет два режима работы:

1. транспортировка пылеугольного шлака в резервуар для его смешивания и хранения с летучей золой;
2. транспортировка шлака в топку котла системой *MAR* для его превращения в ценную летучую золу.

Новый трубопровод в связи с наличием такого высоко-абразивного материала как угольная зола изнутри выложен устойчивым к изнашиванию материалом. В случае выбора линии повторной транспортировки, зольный остаток пневматически транспортируется в приемочные резервуары, расположенные на высоте 18 метров. На рис. 2 изображена транспортировочная линия и месторасположение приемочных резервуаров в котельной.

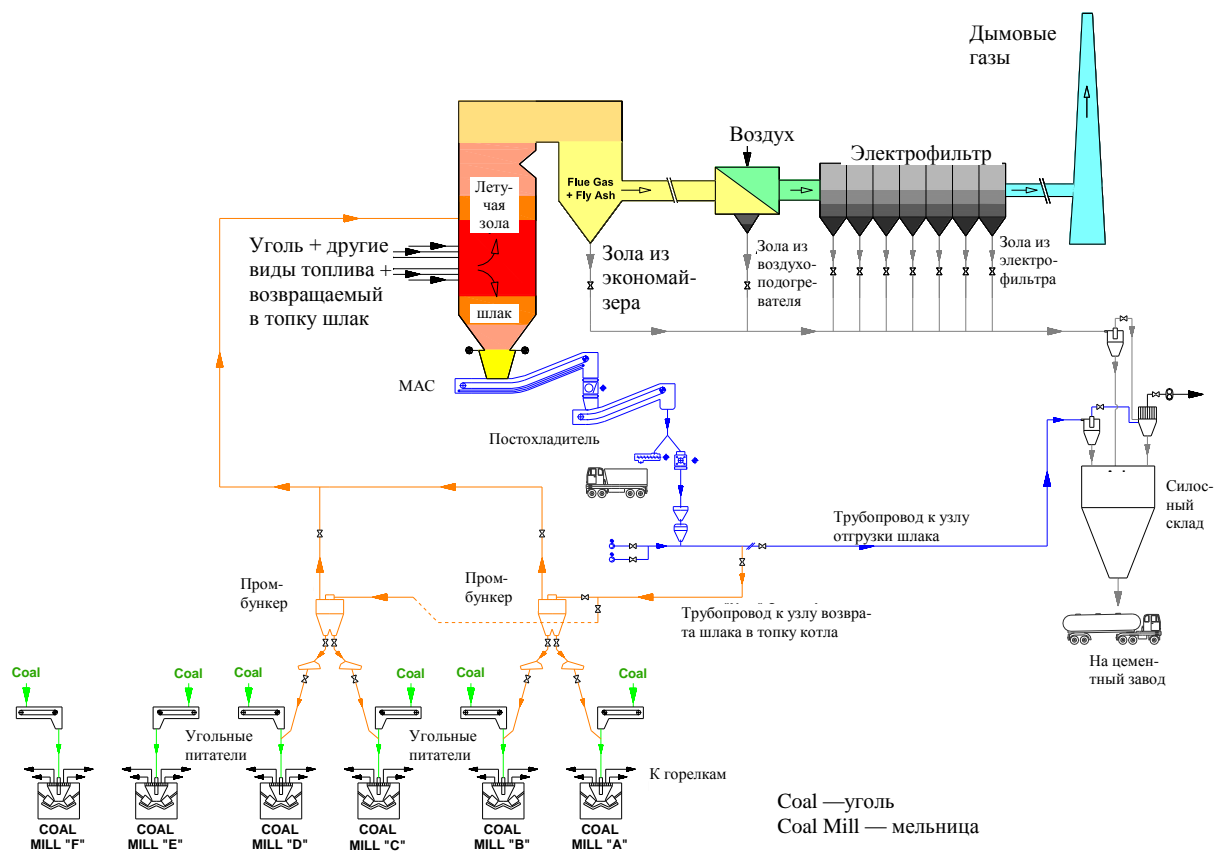


Рис. 1. Схема пневмомеханического шлакоудаления Магалди с возвратом шлака в топку котла

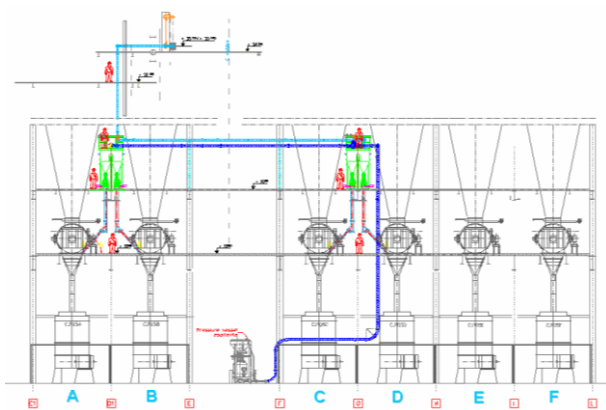


Рис. 2. Трубопроводная линия транспортировки золы

2.5. Приемочные резервуары

В каждом приемочном резервуаре шлак остается на дне, в то время как мельчайшие частицы перемещаются транспортирующим воздухом в топку котла. Шлак извлекается из приемочных резервуаров с помощью трубчатых вибропитателей и загружается непосредственно в сырьевой бункер угольных дробилок. Один приемочный резервуар служит для двух угольных дробилок, поэтому было необходимо установить два вибропитателя для каждого приемочного резервуара. Каждый приемочный резервуар также оснащен разрывной мембраной для экстренной разгрузки и четырехуровневыми зондами. Приемочный резервуар осуществляет сортировку шлака по гранулометрическому составу для

обеспечения подачи в топку котла лишь мельчайших частиц (рис. 3).



Рис. 3. Приемочный резервуар, расположенный между угольными бункерами.

Из каждого приемочного резервуара транспортирующий воздух по пневматической системе поступает в котел через отверстие, расположенное на

высоте 35 м. Участок состоит из трубных крестовин для обеспечения высокой скорости потока на входе в топку котла и для предотвращения оседания частиц шлака в трубе.

2.6. Вибропитатели

Вибропитателей всего четыре. Система логического управления корректирует долю подаваемого шлака в зависимости от фактической подачи угля в топку котла. Система контроля позволяет поддерживать соотношение шлак/уголь в приблизительно постоянной пропорции.

Смесь угля и возвращаемого шлака после измельчения в угольной дробилке транспортируется первичным воздухом в пылеугольные горелки и затем вводится в топку котла.

Измельченный шлак, наконец, превращается в летучую золу.

3. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ MAR

При запуске система *MAR* функционирует в ручном режиме, чтобы обеспечить накопление минимального объема золы в приемочных резервуарах. Данный признак внимательно отслеживается для обеспечения необходимого разъединения оборудования с избыточным давлением (вибропитатели и угольные дробилки) и с разрежением (топка котла). В нормальном режиме работы объем возвращаемого шлака в приемочных резервуарах поддерживается на постоянном уровне при помощи двух низкоуровневых зондов. С другой стороны, загрузка приемочного резервуара контролируется двумя высокоуровневыми зондами.

Каждый приемочный резервуар имеет по две точки разгрузки со специальными вибропитателями для дозирования подачи шлака в угольные дробилки. Как результат деятельности системы логического управления установкой, расход шлака, подаваемого в угольные дробилки, зависит от частоты вращения соответствующего питателя угля.

При функционировании обоих приемочных резервуаров могут наблюдаться следующие режимы работы:

- Одна угольная дробилка не действует: размол возвращаемого шлака осуществляется тремя угольными дробилками;
- Две угольные дробилки не действуют: размол возвращаемого шлака осуществляется двумя угольными дробилками (данный режим работы должен длиться как можно меньше, чтобы сократить износ дробилок);
- Три угольные дробилки не действуют: размол возвращаемого шлака не может быть осуществлен, шлак пневматически транспортируется в бункер для летучей золы.

Благодаря наличию автоматической системы управления установка может работать по одному из трех режимов. Подача шлака в угольные дробилки корректируется соответствующим вибропитателем в полностью автоматическом режиме. Достаточно

один раз вычислить расход возвращаемого шлака, и соответствующий сигнал управления будет направляться в вибропитатель. На рис. 4 изображена расходная характеристика типового вибропитателя.

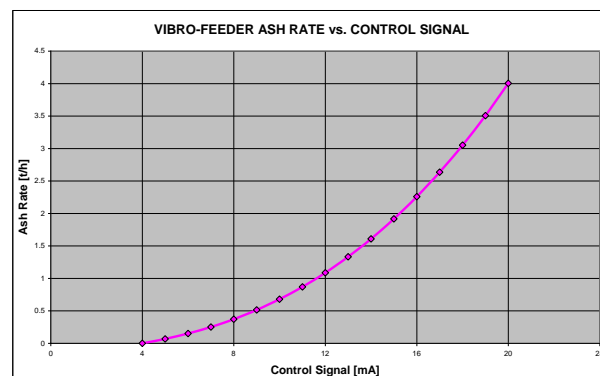


Рис. 4. Уровень золы в зависимости от сигнала управления

3.1. Результаты эксплуатационных испытаний износа угольной дробилки

После установки системы *MAR* на электростанции Fiume Santo были проведены экспериментальные исследования для оценки фактического износа угольных дробилок.

Как уже было сказано, каждый котел оснащен шестью дробилками с угольным ковшем Raymond XRP 783, работающими под избыточным давлением (одна дробилка всегда находится в резерве) и тангенциальной системой горения. Только четыре из шести угольных дробилок осуществляют прием возвращаемого шлака.

Контроль износа угольных дробилок обычно осуществлялся каждые 2000...2100 часов работы. Контролировалось состояние ковша, разламывающей тарелки и сортировщика дробилки. В каждом периоде наблюдения при помощи шаблона калибров измерялась величина износа. Кроме того, каждый рабочий валец был взвешен для измерения потерь массы. На рис. 5 представлены численные результаты почти двухлетнего функционирования системы *MAR* в обычном режиме работы.

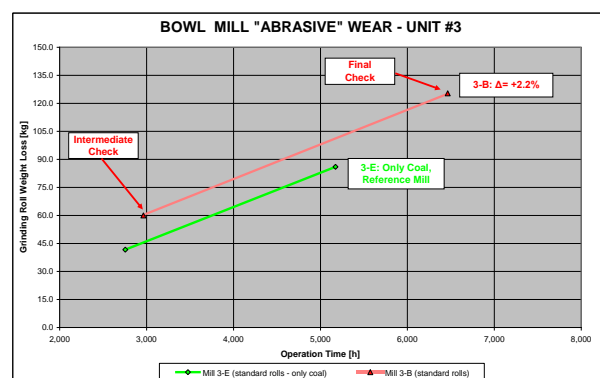


Рис. 5. Результаты абразивного износа угольного ковша

Полученные результаты свидетельствуют о том, что износ составил 2...3 %. Указанная относительная величина износа получена при расходе шлака 1,0 т/час, то есть при соотношении зола/уголь приблизительно 1 % на каждую угольную дробилку.

4. СЕРТИФИКАЦИЯ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ

Внедрение MAR-Системы Магальди по вторичному использованию золы на электростанции Fiume Santo также решило еще одну важную задачу, показав, что свойства летучей золы не изменились в связи с возвратом шлака в топку котла.

Летучая зола, полученная после внедрения системы возврата шлака в топку котла, полностью соответствует Европейскому стандарту EN 450-1 и сертифицируется в качестве ценного сопутствующего продукта для цементной и бетонной промышленности.

Таким образом, после установки системы MAR шлак больше не рассматривается в качестве отходов сгорания угля, а представляет собой ценный сопутствующий продукт, поскольку полностью трансформируется в летучую золу.

В 2007 г. для получения указанного сертификата продукции электростанция подвергла сертификации весь процесс производства от разгрузки углевоза до доставки летучей золы заказчику (EN ISO 9001).

В течение первых трех месяцев в составе процедур оценки качества были проведены всесторонние химический и физический анализы, результаты которых кратко представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Результаты анализа химического состава летучей золы

Элемент	Предел	Описание предела
Потери при прокаливании	Категория А: < 5,0 % * Категория В: 2,0...7,0 % * Категория С: 4,0...9,0 % *	Диапазон
Хлорид	0,10 % *	Максимальное значение по СГ
Серный ангидрид (SO ₂)	3,0 % *	Максимальное значение
Свободный оксид кальция	2,5 % *	Максимальное значение
Реактивный оксид кальция	10 % *	Максимальное значение
Реактивная двуокись кремния	25 % *	Максимальное значение
Двуокись кремния (SiO ₂), оксид алюминия (Al ₂ O ₃) и оксид железа (Fe ₂ O ₃)	Суммарно 70 % *	Максимальное значение
Щелочи	5,0 % *	Максимальное значение
Оксид магния (MgO)	4,0 % *	Максимальное значение
Растворимый фосфат (P ₂ O ₅)	100 мг/кг	Максимальное значение

Примечание: * — по массе

Вслед за периодом наблюдений был проведен анализ статистических данных с соблюдением следующих условий:

- Отбор образцов для их проверки третьей стороной (органом сертификации);

- Высококласная аудиторская проверка третьей стороной (органом сертификации) для анализа технического процесса;
- Временная сертификация, основанная на заявленных результатах;
- Подтверждение сертификата после дальнейшей проверки;
- Постоянная деятельность по контролю для статистического анализа.

Таблица 3. Результаты анализа физических свойств летучей золы

Свойства	Предел	Описание предела
Крупность	Категория N: 40 % очень крупного размера*; ± 10 % от заявленной величины Категория S: 12 % очень крупного размера*	Максимальные величины при сите 0,045 мм
Индекс активности	75 % - 28 дней, 85 % - 90 дней	Минимальные величины
Прочность	10 мм	Максимальная величина
Плотность	± 200 кг/м ³	Максимальное отклонение от величины, заявленной производителем

Примечание: * — по массе

Всесторонние аналитические исследования в соответствии со стандартами качества продемонстрировали, что внедрение системы MAR отрицательно не повлияло на свойства летучей золы.

Крупность золы определяется как соотношение массы в % от золы, удержанной при влажной фильтрации через сито 0,045 мм (в соответствии с EN 451-2) и должна находиться в пределах, обозначенных в EN 450-1.

На рис. 6 и 7 изображены ежемесячные тренды крупности и содержания п.п.п., полученные в ходе вышеупомянутых исследований до (апрель 2007 г.) и после (май 2008 г.) внедрения системы MAR.

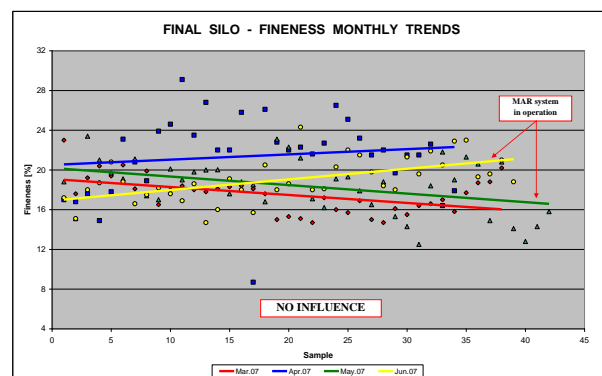


Рис. 6. Ежемесячные тренды крупности шлака до и после внедрения системы MAR

На рис. 8 изображен сертификат летучей золы, полученный E.On Italia для электростанции Fiume

Santo в полном соответствии с Европейским стандартом EN 450-1.

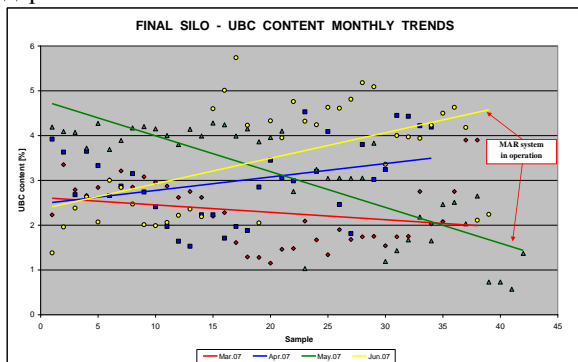


Рис. 7. Ежемесячные тренды содержания п.п.п. до и после внедрения системы MAR

CERTIFICATION FILE			
Certificate Number	AG5/000005		
Type	de conformidad CE con la Directiva 89/106/CEE (1*)		
Product	Fly ash		
Issue date	2007-04-27		
Title	ENDESA ITALIA S.P.A		
Address	VIA G. MANGILI, 9 00197 ROMA (ITALIA)		
Manufacturers:1	CENTRALE TERMoeLECTRICA FIUME SANTO 07100 CABU ASPRU (SASSARI) (ITALIA)		
Standards applied:1	UNE-EN 450-1:2006 EN 450-1:2005		
References included:1			
Fineness (Category)	Fineness (Declared value)	Loss on ignition (Category)	Particle density (Declared value)
N	19	B	2.200

Рис. 8. Сертификат летучей золы EN 450-1

Летучая зола на электростанции Fiume Santo была классифицирована в соответствии со следующими характеристиками.

- Крупность: категория “N” (максимально 40 % по массе > 0,045 мм).
- Объявленная ценность крупности: 19 % (± 10 % пределы отклонений).
- Потери при прокаливании: категория “B” (2...7 % по массе).
- Плотность частиц: 2200 кг/м³ (± 200 кг/м³ отклонение).

4.1. Результаты проекта Fiume Santo

Внедрение MAR-Системы Магалди по вторичному использованию золы на электростанции Fiume Santo дало следующие основные результаты:

1. Вторичное использование зольного остатка в угольных дробилках оказывает незначительное воздействие на уровень их износа;
2. Трансформация пылевидного зольного остатка в летучую золу повышает качество и количество летучей золы; кроме того, отмечено снижение доли негорючего угля благодаря эффекту разбавления зольного остатка, который характеризуется очень низким содержанием негорючего угля;
3. Трансформация зольного остатка в летучую золу не оказывает отрицательного воздействия на свойства летучей золы, что ведет к ревальвирова-

нию зольного остатка из отхода сгорания угля в ценный сопутствующий продукт;

4. В самом деле, производство летучей золы возрастает при вторичном использовании зольного остатка, сертифицированного в строгом соответствии с Европейскими стандартами, что означает отсутствие ограничений при перевозке через страны-члены Евросоюза.

5. ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВТОРИЧНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГОЛЬНОЙ ЗОЛЫ

Вопрос вторичного использования продуктов сжигания угля освещался во многих публикациях, большое количество организаций и правительственных агентств по всему миру продвигают модель развития бетонной промышленности с использованием угольной золы. Целью данного раздела является предоставление обзора основных сфер применения продуктов сжигания угля, и, в особенности, летучей золы.

Ежегодно ТЭС вырабатывают огромное количество побочных продуктов сжигания угля, пригодных к употреблению.

Идея использования золы в качестве строительного материала не нова. Более 2000 лет назад – задолго до изобретения портландцемента – римляне использовали вулканическую золу для строительства величайших конструкций, доживших и до наших дней, например, Римского Пантеона. Современный интерес к использованию летучей угольной золы как цементирующего продукта появился в послевоенной Европе. К 1950-60 гг. электростанции США накапливали летучую золу и находили множество вариантов ее полезного применения.

Летучая зола может быть использована для строительных и непрочных конструкций; как минеральный наполнитель для красок, кровельных материалов, основ ковровых покрытий и прочих продуктов. Она может также использоваться в производстве строительных растворов и штукатурки. Ее даже можно использовать в сельском хозяйстве. Но основной сферой применения летучей золы является производство портландцемента и бетона.

Обычно портландцемент состоит на 95 % из клинкера и на 5 % из гипса. Гипс известен как дополнительное цементирующее вещество, которое улучшает характеристики цемента, его схватывание и затвердение. В дополнение к гипсу одновременно с клинкером и гипсом могут быть использованы другие минеральные добавки, известные как второстепенные цементирующие материалы, или они могут быть добавлены непосредственно во время вымешивания бетона.

Бетон, самый распространенный строительный материал в мире, является в первую очередь смесью нерудных строительных материалов (горных пород и песка), цемента и воды. Составляющие цемента взаимодействуют с водой до образования клея, который превращает песок и горные породы в затвердевшую массу.

5.1. Основная цель: снижение выбросов углекислого газа

В процессе производства портландского клинкера непосредственный выброс CO_2 возникает из-за двух основных источников, а именно из-за расщепления карбоната кальция (основной исходный материал) и сжигания органического топлива. Первый вызывает образование около 0,6 кг $\text{CO}_2/\text{кг}$ клинкера, в то время как последний — 0,25...0,35 кг $\text{CO}_2/\text{кг}$ клинкера, в зависимости от содержания углерода в органическом топливе. Таким образом, общая средняя величина составляет 0,9 кг $\text{CO}_2/\text{кг}$ клинкера. Попытки найти альтернативные источники энергии взамен органического топлива имеют место, но в настоящее время использование альтернативных источников стоит слишком дорого. Кроме того, некоторые виды цементов не требуют карбоната кальция в качестве исходного материала (например, магнезиофосфатные цементы), но их использование для крупномасштабных проектов ни экономически, ни технически нецелесообразно.

Годовой объем мирового потребления цемента практически удвоился за последние 15 лет, и значимость проблемы глобальных выбросов CO_2 , связанных с производством клинкера, стала совершенно очевидной.

В связи с этим необходимо выработать долгосрочную стратегию развития бетонной промышленности.

Каждая тонна летучей золы, используемой в качестве второстепенного цементирующего материала, может заменить одну тонну портландского клинкера. Кроме того, при добавлении летучей золы в бетонную смесь часть цемента может высвободиться. Результатом становится более крепкий и долговечный бетон, нежели чем бетон, сделанный исключительно из цемента. При добавлении летучей золы в бетон она взаимодействует с гидроксидом кальция и образует устойчивые гидраты силиката кальция и алюмината кальция. Получившийся бетон становится не только крепче и долговечней, но и более влагонепроницаемым. Это делает его более устойчивым к химическому воздействию. Использование золы сокращает содержание хлоридов, а также повышает сульфатостойкость бетона. Добавление летучей золы в бетонный массив играет важную роль в снижении образования трещин благодаря низкой экзотермии. Небольшой размер и сферическая форма частиц летучей золы позволяет им заполнять пустоты, создавая эффект шарикоподшипника, что позволяет использовать меньше воды, тем самым улучшая удобоукладываемость и вязкость бетона. Кроме того, летучая зола улучшает кривую гранулометрического состава бетонной смеси. Эти особенности оказывают значительное воздействие на водопотребление, результатом чего становится сокращение использования воды.

Таким образом, рост использования доступных объемов летучей золы в качестве добавочного цементирующего материала или использование ее в производстве бетона является, несомненно, самым

мощным средством сокращения отрицательного воздействия на окружающую среду двух основных секторов промышленно развитой экономики, а именно цементной промышленности и угольной энергетики. Кроме того, использование летучей золы позволяет сохранять природные ресурсы, которые в противном случае пришлось бы добывать для производства цемента.

Экологически чистые цементы на основе портландского клинкера могут быть произведены с долей клинкера 0,5 и менее при использовании значительных объемов гранулированного доменного шлака или летучей угольной золы или их комбинации. Также может использоваться природная или прокаленная зольная пыль в комбинации с летучей золой и/или гранулированным доменным шлаком. Если проводить сравнение с портландцементом, то цементы с высоким содержанием летучей золы или шлаков несколько медленнее схватываются и затвердевают, но они больше подходят для производства бетонной продукции с высокой износостойкостью. К сожалению, мировая практика технологии производства обычного бетона подчиняется директивным нормам, не позволяющим использовать большие объемы минеральных добавок.

Европейская цементная спецификация (European Cement Specification) EN 197/1, изданная в 2006 г., содержит 26 типов портландцемента с минеральными добавками, включая три типа цемента с долей клинкера 0,35...0,64. Тип III-A включает шлаковые цементы с содержанием гранулированного доменного шлака 36...55 %; тип IV-B включает пуццолановые цементы, содержащие 36...55 % зольной пыли, такой как летучая зола, природные или прокаленные зольные материалы, и микрокремнезем; тип V-A включает композитные цементы, содержащие 18...30 % гранулированного доменного шлака плюс 18...30 % зольной пыли. Согласно статистическим данным цементного комитета (Cembureau) в 2005 г. потребление обычного портландцемента упало в странах ЕС до 30 % суммарного объема произведенного цемента, в то время как портландцемент с минеральными добавками, содержащий до 25 % добавочных цементирующих материалов, завоевал 57 % рынка, а портландцемент с долей добавочных цементирующих материалов свыше 25 % приближается к отметке в 10 % от суммарного потребления цемента.

В вопросе снижения прямых выбросов углекислого газа, относимых на производство портландского клинкера, новейшая технология производства бетона с высокой долей летучей золы (*high-volume fly ash*, HVFA) является прекрасным примером, демонстрирующим возможность производства износостойких и экологически чистых бетонных смесей с долей клинкера 0,5 и менее с использованием обычной летучей угольной золы, которая доступна в любом уголке мира в больших количествах. Состав и характеристики бетона с высокой долей летучей золы освещаются во многих публикациях, поэтому в данной работе мы им уделим лишь небольшое внимание. Необходимо отметить, что бетонные

смеси со схожими свойствами могут быть произведены при использовании большого количества гранулированного доменного шлака или смеси летучей золы и шлака с добавлением или без минеральных примесей.

Цементирующий материал в бетоне с высокой долей летучей золы состоит из обычного портландцемента и летучей золы, массовой долей минимум 50 % общей массы цементирующего материала. Смесь характеризуется низким водосодержанием (100...130 кг/м³) и низким содержанием цементирующих материалов (например, 300 кг/м³ для обычной прочности и максимально 400 кг/м³ для повышенной). Пластифицирующие свойства больших объемов летучей золы обеспечивают высокую удобоукладываемость даже при использовании 0,4 т воды/м³. Однако при необходимости обеспечить более низкую величину данного показателя используются химические пластифицирующие добавки. Если требуется защита от замерзания, то в смесь также включается воздухововлекающая добавка.

В сравнении с портландцементным бетоном смеси с бетоном с высокой долей летучей золы спроектированы для достижения той же самой крепости за 28 дней, демонстрируя превосходную технологичность даже при осадке на 200...250 мм. Обычно бетон медленно схватывается и затвердевает, т.е. достигает меньшей крепости за 3 или 7 дней, той же крепости за 28 дней и гораздо большей крепости за 90 дней или 1 год. Пуццолановая реакция, ведущая к полному исключению гидроксида кальция из продуктов гидратации цемента делает бетон с высокой долей летучей золы крайне устойчивым к взаимодействию между щелочными составляющими, к воздействию сульфатов и коррозии арматуры (благодаря очень низкой электропроводности).

Кроме того, смеси бетона с высокой долей летучей золы гораздо менее подвержены образованию трещин как при термической усадке (меньшая теплота гидратации), так и усадке при высыхании (меньший объем цементного теста). Поэтому помимо очень низкой доли содержания клинкера, возможность бетона с высокой долей летучей золы достигать уровня износостойкости 5...10 делает его подходящим материалом для строительства экологически чистых сооружений в будущем.

6. ВЫВОДЫ

Система Магалди по возврату шлака в топку котла *MAR* обладает возможностью способствовать превращению шлака в пользующуюся спросом летучую золу с полным сокращением затрат на удаление шлака. Кроме того, было достигнуто снижение доли п.п.п. в летучей золе благодаря эффекту разбавления. Превращение шлака в летучую золу не оказывает отрицательного воздействия на свойства летучей золы. Летучая зола полностью соответству-

ет международным стандартам (в Европе EN197-1 для цемента и EN 450-1 для бетона) и сертифицируется в строгом соответствии с Европейскими стандартами.

Возврат шлака в топку котла оказывает незначительное воздействие на уровень износа угольных дробилок.

Во многих странах вскоре будет применен уже сточенный подход к местам захоронения отходов ТЭС и многие ограничения будут приведены в соответствие с ним. Поэтому, чтобы сократить или исключить косвенные затраты по захоронению отходов, а также повысить ценность использования летучей золы во многих сферах, необходимо предпринять оптимизационные меры. В таком случае система *MAR* прекрасно подходит для достижения указанной цели, а также для комплексного использования обогащенной золы и получения сопутствующего продукта, который может быть вторично использован при производстве цемента и бетона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы хотели бы выразить свою благодарность сотрудникам электростанции Fiume Santo за их поддержку компании «Магалди» во время проведения исследований.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. **Austin D.R., Milana G. and Carrea A.** Bottom ash dry extraction helps to achieve 'Zero water discharge' and gives additional benefits // Power-Gen Europe 1994, Koel, Germany, Vol.8, May 1994.
2. **Carrea A. and Tarli R.** An efficient and non-polluting bottom ash extraction system // Energy for the transition age, Florence, Italy, June 1992.
3. **Carrea E. and Graziadio M.** Bottom ash carbon content reduction by means of dry extraction system, a Thermie project // Proceedings of Fifth International Conference on technologies and combustion for a clean environment, Lisbon, July 1999.
4. **Mehta P.K.** Coal fly ash – the most powerful tool for sustainability of the concrete industry// "ASH at work", Issue 1, 2008.
5. **Various Authors** The Italian Approach to the Problem of Fly Ash // International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper №84, 1999.
6. Web site: www.aaa-usa.org, American Coal Ash Association.
7. Web site: www.ecoba.com, European Coal Combustion Products Association.

Превращение шлака в летучую золу и обзор возможностей повторного использования угольной золы. Изучение результатов на примере электростанции Фиуме Санто. Бэртолино, Д. Коппола, Д. Риччи и др. // Материалы II научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 23–24 апреля 2009 г. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 87 – 94.