

## Раздел третий

### ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

#### 3.7. Аналитические материалы

##### 3.7.21. Использование кальциевой летучей золы в Германии

*Х.-Й. Фюрборн — VGB PowerTech e.V., Эссен, Германия*

*Б. Мюллер — MUEG, Браунсбеда, Германия*

*Э. Вальтер — Vattenfall Europe Generation AG, Коттбус, Германия*

#### АННОТАЦИЯ

На электростанциях Германии, сжигающих бурые угли, ежегодно образуется около 10 млн т золы и 5 млн т гипса установок сероочистки дымовых газов. Большая часть золы используется для заполнения и восстановления отработанных карьеров. Кроме того, они используются для закладки шахт, в целях рекультивации земель, улучшения свойств грунтов, для производства цемента и в качестве добавки при производстве бетона. Гипс установок сероочистки используется в гипсовой и цементной промышленности, и все чаще - в качестве удобрения и для кондиционирования почвы.

Использование кальциевой золы ТЭС, сжигающих бурые угли, зависит от их химических, минералогических и физических свойств. Эти свойства зависят от технологии сжигания, месторождения угля, а также способа угледодачи. Постоянное качество продукции имеет большое значение для ее использования при производстве гидравлических вяжущих, цемента и бетона.

В статье рассматриваются вопросы утилизации кальциевой золы ТЭС Германии, сжигающих бурый уголь, существующие области применения и результаты последних научных исследований, касающихся использования золы при производстве многокомпонентных цементов.

**Ключевые слова:** бурый уголь, кальциевая летучая зола, свойства, реактивность, утилизации, рекультивация, закладка шахт, улучшение свойств грунта, многокомпонентный цемент, бетон

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

В Германии доля угля при производстве энергии и пара в 2010 году составила 42,4%. В 2010 г. потребление каменных и бурых углей на ТЭС составило около 44 млн т и 150 млн т, соответственно. При этом при сжигании бурых углей образовалось около 22 млн т побочных продуктов сжигания угля (ППСУ), в том числе около 9 млн тонн летучей золы и около 5,5 млн т гипса. На использование золы значительное влияние оказывает ее качество, т.е., в первую очередь, изменение химических и физических свойств. Вследствие этого, летучая зола каменных углей является более предпочтительной, чем большинство видов золы бурых углей, состав которых меняется сравнительно сильнее. Гипс установок сероочистки почти полностью используется для замещения природного гипса в гипсовой и цементной промышленности, а также применяется в сельском хозяйстве.

Летучая зола бурых углей преимущественно используются для заполнения карьеров после смешивания ее с обычной водой или водой установок сероочистки дымовых газов с целью формирования стабильных продуктов гидратации. Кроме того, зола используется для закладки шахт, рекультивации земель, улучшения свойств грунтов, в целях иммобилизации, а также для производства цемента и бетона. Для использования золы в качестве добавки при производстве бетона выдается техническое свидетельство, в котором отображено, что свойства летучей золы соответствуют требованиям DIN EN 450 «Летучая зола для бетонов». Недавние научно-исследо-

вательские работы сосредоточены на использовании золы при производстве многокомпонентных цементов. Летучая зола была также использована в пилотных проектах по производству гидравлических вяжущих для дорожного строительства и многокомпонентных цементов СЕМ II-B (W-LL).

#### 2. ШАХТЫ ПО ДОБЫЧЕ БУРЫХ УГЛЕЙ В ГЕРМАНИИ

В Германии добыча бурого угля сосредоточена в четырех регионах, где бурый уголь добывается исключительно карьерным способом (рис. 1).

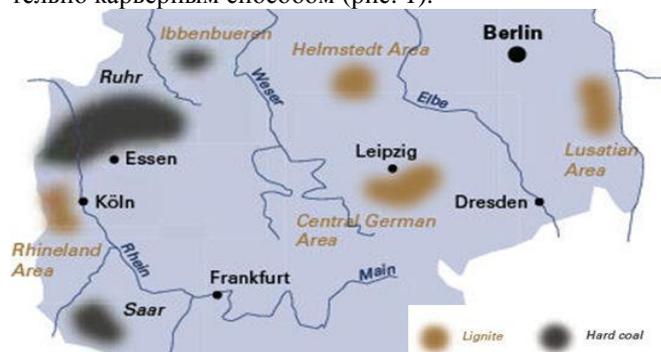


Рис. 1. Районы добычи бурого угля в Германии [1]

В 2010 г. в Рейнской области всего было добыто 169,4 млн. т бурого угля, в западной части Германии рядом с городами Кельн-Ахен-Менхенгладбах, образующими треугольник, добыча угля составила 54 % по массе, в Центральной Германии рядом с г.Лейпцигом – 12 % по массе, в Лужицком районе к юго-востоку от Бранденбурга и к северо-востоку от Саксонии – 33 % по массе и в районе шахт Хиршберг вблизи г. Хельмштедта -1 % по массе [1].

Большая часть бурого угля сжигается на крупных электростанциях вблизи шахт; угольная пыль и брикеты транспортируются потребителям по железной дороге или в грузовиках.

#### 3. ПРОИЗВОДСТВО ППСУ НА ТЭС, СЖИГАЮЩИХ БУРЫЕ УГЛИ

ППСУ, образованные на ТЭС, сжигающие бурые угли, включают, в основном, летучую золу, шлак котлов с твердым шлакоудалением (ТШУ) и гипс установок сероочистки дымовых газов котлов с ТШУ (рис. 2).

Большинство ТЭС, сжигающих бурые угли, являются пылеугольными электростанциями. Лигнит измельчается до тонкой пыли в угольных мельницах и пневматическим способом подается в пылевые горелки. В топке электростанции сжигается бурый уголь в распыленном состоянии. Образовавшееся тепло нагревает воду в водопаровом контуре, расширяющийся пар вращает турбину. Незначительная часть минерального вещества бурого угля падает на дно топки, откуда оно удаляется из шлаковой ванны в виде шлака.

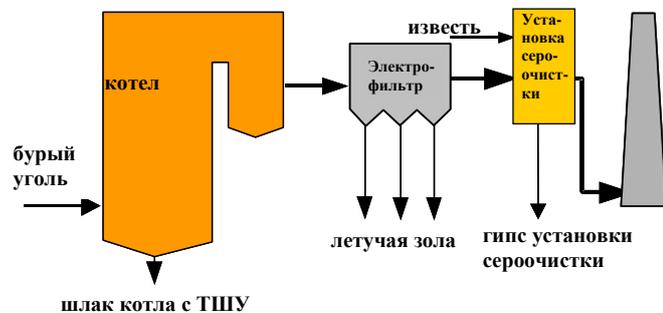


Рис. 2. Процесс сжигания и образования ППСУ на ТЭС, сжигающих бурые угли

Большая часть золы - около 80% минерального вещества уносится вместе с дымовыми газами в электрофильтр. Отношение выхода шлака к выходу летучей золы, образовавшихся на ТЭС при сжигании бурых углей, составляет примерно 1 к 4. После очистки дымовых газов от золы в электрофильтре сера удаляется из них в установке сероочистки дымовых газов, где производится гипс. Очищенные от золы и серы дымовые газы выводятся через дымовую трубу или градирню.

В табл. 1 приведены статистические данные об объемах образования ППСУ на ТЭС Германии, сжигающих бурые угли, и их использовании в 2010 г. [2]. Всего было произведено около 15 млн. т ППСУ, в том числе 8,5 млн т золы бурых углей, 1,6 млн. т шлака котлов с ТШУ и 4,8 млн. т гипса.

Таблица 1. Производство и использование ППСУ ТЭС Германии, сжигающих бурые угли в 2010 г. [2]

Мощность, МВт <sub>г</sub>		68.870	
Потребление угля, млн т		150	
ППСУ	производство	утилизация	
		Восстановление/рекультивация	Другие применения
	Млн т	%	%
Шлак котлов в ТШУ	1,63	97	3
Летучая зола	8,47	97	3
Зола котлов с КС	0,33	100	
Гипс установок сероочистки	4,83	5	95*
Всего	15,26	62	38

\* 16 % от этого количества по массе – временное складирование

#### 4. УТИЛИЗАЦИЯ ЗОЛЫ БУРЫХ УГЛЕЙ

На использование золы существенным образом влияет ее качество, т.е. изменение химико-минералогического состава, а также физических свойств. В связи с этим, зола каменных углей является более предпочтительной, чем большинство видов золы бурых углей, состав которых подвержен сравнительно большим колебаниям. Изменения химических характеристик золы бурых углей, сжигаемых на ТЭС Германии в различных

районах добычи, приведены в табл. 2 [3]. Следует учитывать, что изменение состава летучей золы от одной ТЭС гораздо менее существенно.

Таблица 2. Изменения основных и второстепенных химических параметров золы бурых углей ТЭС Германии в разных районах добычи угля [3]

Параметр	Район добычи угля		
	Рейнская область	Центральные районы Германии	Лужицкая область
	[% по массе]		
SiO <sub>2</sub>	20 – 80	18 – 36	32 – 68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 – 15	7 – 19	5 – 14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5 – 20	1 – 6	6 – 22
CaO	2 – 45	30 – 52	8 – 23
CaO <sub>своб</sub>	2 – 25	9 – 25	0,1 – 4
MgO	0,5 – 11	2 – 6	2 – 8
K <sub>2</sub> O	0,1 – 1,5	0,1 – 0,5	0,5 – 2
Na <sub>2</sub> O	0,1 – 2	0,01 – 0,2	0,01 – 0,2
SO <sub>3</sub>	1,5 – 15	7 – 15	1 – 6
TiO <sub>2</sub>	0,1 – 1	0,5 – 1,3	0,2 – 1
Cl	< 0,2	< 0,1	< 0,02
C	< 2	< 1	< 2
LOI	макс 5	макс 5	макс 5

Самые значительные колебания наблюдаются с содержанием SiO<sub>2</sub>. Это вызвано различием песчаных слоев в лигнитных пластах. В летучей золе Рейнской и Центральной областей Германии находится большое количество извести и серы по сравнению с золой Лужицкой области. Количество реактивного кремния, извести, свободной извести, оксида магния, оксида алюминия и серы, а также аморфного материала являются маркерами реактивности, а также потенциальных областей применения.

В 2010 г. около 97 % летучей золы бурого угля по массе используется для заполнения и восстановления отработанных карьеров добычи бурого угля [2]. Оставшиеся 3% были использованы для закладки шахт, рекультивации земель, улучшения свойств грунтов, с целью имобилизации и для производства цемента и бетона. Предпосылки для применений золы в некоторых направлениях, а также существующие предельные значения в стандартах или нормативах будут даны ниже. Кроме того, будут представлены конкретный проект по улучшению свойств грунтов, а также результаты научных исследований и пилотные проекты по использованию летучей золы для производства гидравлических вяжущих для дорожного строительства и для производства цемента (СЕМ II-W).

##### 4.1. Заполнение отработанных карьеров добычи бурых углей

На основе горного законодательства Германии [4] зоны отработанных карьеров должны быть заполнены полностью или, по крайней мере, частично, для сельскохозяйственных и лесохозяйственных целей. В этом законе четко прописывается то, что наибольшая доля золы используется для сокращения дефицита массы при добыче

бурого угля. Для этого зола должна отвечать требованиям Директивы о размещении отходов [5].

В горных районах Германии заполнение карьеров осуществляется по-разному. В Центральной Германии для заполнения карьеров используется вода, смешанная с золой. Использование воды необходимо для гашения свободной извести, которая может привести к неустойчивости уплотненных слоев при контакте с водой. Самотвердеющие свойства летучей золы образуют устойчивые монолиты с течением времени. В Лужицкой области увлажненная летучая зола используется для заполнения карьеров, частично смоченная водой установок сероочистки дымовых газов. В Рейнской области летучая зола смешивается с водой установок сероочистки для обеспечения хорошей базы для стабильных и долговечных устойчивых оснований. В зависимости от происхождения летучие золы бурых углей имеют различные самотвердеющие свойства. Во время сложного процесса твердения и дальнейшей гидратации растут новые минералы в пористых структурах, что ведет к сокращению объема пор, увеличивая плотность и прочность конструкции и, следовательно, приводит к сниженной водопроницаемости.

В зависимости от направлений применения (укрепление берегов, обеспечение мер безопасности или заполнение шахт) смесь летучей золы с водой установок сероочистки должна отвечать специальным требованиям по прочности на сжатие, водопроницаемости и выщелачиванию. Закладка шахт контролируется местными органами горного управления. Материалы, используемые для этой цели, определяются в планах горных работ и реструктуризации горных компаний, и их необходимо согласовывать с властями [6].

#### 4.2. Закладка шахт

При проведении подземных горных работ зола бурых углей используется как компонент вяжущих или непосредственно как уплотнительный и укладочный материал. Они также служат для наращивания несущих и боковых откосов дамб, а также для заполнения и перекрытия отработанных шахт. Благодаря их самотвердеющим свойствам, они также используются непосредственно для заполнения шахты. Для этого раствор закачивается в подземные галереи. После схватывания и твердения контролируется прочность образования.

При использовании золы бурых углей в подземных горных работах необходимо следовать требованиям горного законодательства и получить разрешения от компетентных органов горного управления. Предъявляемые требования различны в каждой стране.

#### 4.3. Улучшение свойств грунтов

Зола бурых углей является эффективным компонентом для химической и/или механической стабилизации грунтов. Улучшение свойств грунтов имеет особое значение при строительстве проезжих и железных дорог. Летучая зола с большим содержанием извести эффективна для стабилизации грунтов, в зависимости от содержания свободного оксида кальция. Зола с низким содержанием извести может быть использована вместе с цементом или известью для той же цели.

В песок и гравий, состоящие из мелкодисперсных частиц, добавляют летучую золу для увеличения мелкой фракции с размером частиц менее 0,063 мм. Глинистые грунты обрабатывают для уменьшения изменения их

объемов в связи с колебаниями влажности путем связывания частиц грунта в фиксированную матрицу. Другим применением золы бурых углей является стабилизация и укрепление грунтов, таких как обогащение грунтов для улучшения несущей способности, стабилизация обратной засыпки для уменьшения бокового давления грунта и стабилизация откосов для улучшения устойчивости склона.

За последнее десятилетие летучая зола бурых углей Центральной Германии использовалась для улучшения свойств почвы с целью строительства проезжих и железных дорог [7]. На севере Германии шоссе А72 между Ратендорфом и Фробургом строится на глинистых и влажных грунтах. Для земляных работ необходимо переместить 1,5 млн м<sup>3</sup> и обогатить 2 млн м<sup>3</sup> грунта. Грунт состоит из 90 % глины и до 30 % воды. С целью улучшения свойств грунтов было предложено минимальное содержание вяжущих – 3 %. Для определения вяжущего материала были выполнены различные испытания альтернативных вяжущих, в том числе золы бурого угля. По сравнению с другими вяжущими, используемыми для дорожных работ, оказалось, что при применении летучей золы прочность составляет более 12,5 МПа, а водоудерживающая способность была выше, чему у гидравлических вяжущих для дорожных работ того же класса прочности. После обсуждения с властями дорожного управления обогащение грунта летучей золой бурого угля выполнялось в два этапа. Наряду с техническими параметрами необходимо было оценить влияние внесения золы бурых углей на состав почвы и грунтов. А72 - крупнейший строительный проект с использованием более чем 120.000 т золы бурых углей [8].

#### 4.4 Производство многокомпонентных цементов

Фактически в Германии не используется зола бурых углей для производства многокомпонентных цементов. Опыт применения летучей золы бурых углей для производства цемента был получен в прошлом в бывшей ГДР, а в последнее время - в новых научно-исследовательских проектах.

В 1968 г. на цементном заводе Рюдердорф был произведен многокомпонентный цемент PUZ 225. Была использована летучая зола с высоким содержанием кремния и алюминия, содержание серы составило 8 % по массе. Зольность составила около 40 % от массы цемента. Было установлено, что цемент обладает схожими свойствами в отношении термической обработки, морозостойкости и коррозионной стойкости, что и обычный цемент. В 1984 г. на том же цементном заводе был произведен цемент PZ 9/35 с использованием летучей золы бурого угля и низким содержанием щелочи. Доля золы составляла от 20 до 25 % по массе. Цемент PZ 9/40а, произведенный в 1970-е гг. в качестве альтернативы PZ 9/35 с целью повышения прочности на сжатие свыше 40 МПа, преимущественно использовался для производства бетонных изделий из-за его высокой прочности на сжатие после термической обработки [9].

Так как производители цемента должны в дальнейшем снижать выбросы CO<sub>2</sub> от своих производственных процессов, и поскольку возможности технической оптимизации исчерпаны, дальнейшее снижение выбросов CO<sub>2</sub> может быть достигнуто только при повышении уровня производства многокомпонентных цементов. При этом, также летучая зола бурых углей может быть использована для производства цемента, если соблюдаются

требования, предъявляемые к кремниевым и кальциевым золам для производства многокомпонентных цементов, как определено в стандарте DIN EN 197-1 [10].

В начале 1990-х годов свойства и опыт использования летучей золы бурого угля был предметом обширных научно-исследовательских работ [11]. Был реализован проект по использованию кальциевой летучей золы в цементной промышленности [12]. Производители цемента провели исследования кальциевой летучей золы различных электростанций с целью ее использования при производстве многокомпонентных цементов. Был сделан вывод о том, что требования стандарта EN 197-1 [10], как правило, не выполняются. Тем не менее, добавка золы способствовала повышению прочности. Для оптимизации полезного применения золу необходимо измельчить для увеличения мелкой фракции. Благодаря содержанию свободной извести и оксидов магния для проверки устойчивости необходимо проводить также испытания на длительное хранение с использованием холодной воды. В последующие годы был выполнен проект по производству цемента, оптимального по техническим и экологическим показателям [13, 14]. Результаты показали, что, хотя кальциевые золы не отвечают требованиям EN 197-1, они могут использоваться для производства цемента.

Кроме того, энергетики инициировали научно-исследовательский проект по изучению характеристик и свойств многокомпонентных цементов с добавками летучей золы шести электростанций различной мощности, расположенных в разных горнодобывающих областях (Рейнская, Центральная и Лужицкая), фокусируясь на однородности состава золы. В течение шести месяцев 19 образцов отбирались на каждой электростанции, являясь представительными пробами отобранных образцов ежедневно, еженедельно или ежемесячно. Образцы прошли испытания на определение физических и химических параметров. Кроме того, были проведены испытания пас-

тообразных образцов и строительных растворов на равномерность распределения объема, прочность на сжатие и долговечность [15]. Образцы полностью состояли из летучей золы или содержали 10, 20 и 30% золы по массе и были произведены путем измельчения цементного клинкера и золы.

Химический анализ образцов золы из различных областей горнодобывающей промышленности (табл. 2) был выполнен в ходе этого исследования. Кроме того, было подтверждено, что зола Лужицкой области не соответствует требованиям по содержанию реактивного оксида кальция. Эта зола может быть отнесена к классу 1 в соответствии с DIN EN 197-1, поскольку содержание реактивного оксида кальция превышает 10 % по массе. Летучая зола Рейнской и Центральной областей Германии может быть отнесена к кальциевым золам 2 класса из-за большого количества в ней извести - от 30 до 37 % и содержания реактивного оксида кальция - от 26 до 34 % по массе. Тем не менее, требования по прочности на сжатие образцов строительных растворов с использованием молотой летучей золы в качестве вяжущего (> 10 МПа) не могут быть удовлетворены. Требованиям по расширению пастообразных образцов, состоящих из 30% молотой летучей золы и 70 % цемента по массе, отвечают все образцы.

Как и ожидалось, в образцах строительных растворов, полученных с использованием золы бурых углей, наблюдается снижение прочности на сжатие при увеличении количества золы бурых углей при производстве цемента на ранних стадиях созревания - до 28 дней. Прочность на сжатие всех строительных растворов увеличивается при их созревании. В возрасте 28 дней в строительных растворах с добавкой 10 % летучей золы в цемент наблюдается более высокая прочность на сжатие, чем у эталонного раствора из традиционного портландцемента, а при добавке 20 % летучей золы более высокая прочность наблюдается после 90 дней (табл. 3).

Таблица 3. Абсолютная и относительная прочность на сжатие строительных цементных растворов с использованием 10, 20 и 30 % летучей золы буры углей по массе [13]

Содержание летучей золы бурых углей в цементе		Абсолютная прочность на сжатие	Относительная прочность на сжатие после			
уголь из Рейнской области	уголь из Лужицкой области		2 дней	7 дней	28 дней	90 дней
[% по массе]		[мм]	[%]			
0	0	150	100,0	100,0	100,0	100,0
10		150	96,6	95,6	103,5	109,5
20		153	89,9	84,9	93,0	100,6
30		169	87,6	80,5	81,8	89,2
	10	167	98,7	93,1	102,3	110,6
	20	163	94,6	81,9	90,5	102,1
	30	165	81,9	71,4	86,7	95,8

Аналогичные результаты были получены в опытах с двумя различными типами портландцемента и кальциевой золы из центральной и Лужицкой горнодобывающих областей Германии. В строительных растворах с использованием 20 % золы по массе бурого угля Центральных областей Германии взамен цемента наблюдались аналогичные или более высокие показатели прочности на сжа-

тие после 28 суток по сравнению с чисто цементными растворами. В растворах с использованием 20 % золы Лужицкой области по массе взамен цемента были получены показатели прочности от 85 до 100 % от прочности на сжатие чисто цементных растворов [16]. Для этих испытаний образцы хранились при температуре 20 °С и 5 °С.

В 2010 г. компании Dyckerhoff AG и MUEG GmbH произвели цемент с использованием известковой золы электростанции Центральной Германии в рамках совместного научно-исследовательского проекта [17]. Содержание свободной извести в золе составляло 6,5% по массе. Перед использованием в цементе зола частично подвергалась гашению на технологической установке. После кондиционирования золы содержание свободной извести и сухого продукта, который может загружаться при атмосферном давлении, составило менее 3 % по массе. Химический состав летучей золы, используемой для производства СЕМ II В-М (W-LL), приведен в табл. 4.

Таблица 4. Химический состав и специальные параметры летучей золы, используемой для производства СЕМ II ВМ (W-LL) 32,5 R [17]

Параметр	[% по массе]
SiO <sub>2</sub>	28.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.2
CaO	35.5
CaO <sub>своб.</sub>	< 3
MgO	2.3
K <sub>2</sub> O	0.6
Na <sub>2</sub> O	< 0.2
SO <sub>3</sub>	9.1
CaO <sub>реакт.</sub>	27
SiO <sub>2</sub> реакт.	23,1

Цемент был использован для изготовления базовой плиты площадью 3000 м<sup>2</sup> на участке MUEG. Всего было изготовлено 660 м<sup>3</sup> бетона, содержание цемента в котором составляло 360 кг/м<sup>3</sup>, а соотношении воды к вяжущему - 0,45. Полученный бетон был помещен в те же условия, что и традиционный бетон. В процессе твердения бетона не было выявлено каких-либо отклонений его свойств по сравнению с традиционным бетоном. Была изготовлена монолитная плита, на базе которой был построен зал. По плите перемещались контейнеровозы. Через два года после ее эксплуатации трещины или повреждения отсутствовали [17].



Рис. 3. Забетонированная базовая плита, произведенная с использованием СЕМ II ВМ (W-LL) - MUEG [17].

#### 4.5. Гидравлические вяжущие для строительства дорог

Использование летучей золы бурых углей в гидравлических вяжущих для дорожных работ было предметом нескольких научно-исследовательских проектов [18, 19].

На основании результатов этих научных исследований зола бурых углей использовалась в гидравлических вяжущих смесях и гидравлических вяжущих для дорожных работ. В связи с пересмотром Европейского стандарта по гидравлическим вяжущим для дорожных работ и гидравлическим вяжущим смесям Федеральное министерство транспорта, строительства и городского развития Германии заказало проект по исследованию пригодности гидравлических вяжущих смесей с целью их использования для дорожных оснований в соответствии с Европейскими техническими условиями по применению в Германии в 2004 году [20]. Цель научно-исследовательского проекта состояла в том, чтобы собрать Европейский опыт по гидравлическим вяжущим для дорожных работ, которые бы удовлетворяли Европейским стандартам EN 14227 в частях 2 – 4 по использованию шлаковых и зольных вяжущих смесей для дорожных оснований, и выяснить, можно ли их использовать и при каких условиях они могут применяться для строительства дорожных оснований в соответствии с требованиями действующего национального законодательства. В рамках научно-исследовательского проекта различные экспериментальные участки дорог, построенные с использованием шлаковых и зольных вяжущих для дорожной основы в Германии с 1985 по 1998 гг., были исследованы на показатели несущей способности с помощью балки Бенкельмана и свободно падающего дефлектометра. Основные образцы были испытаны на прочность на сжатие и долговечность. Целью научно-исследовательской работы было оценить, являются ли требования частей 2 - 4 Европейского стандарта 14227 достаточными также для рассмотрения опыта, накопленного согласно законодательству Германии. Результаты исследований показали, что в Германии обычно рекомендуется внедрение Европейских стандартов для медленно затвердевающих вяжущих шлаковых и золовых смесей. Было проверено, что применимые смеси из шлаковых и золовых вяжущих являются достаточно морозостойчивыми и имеют длительный срок службы при существующих климатических условиях и в Германии [21].

#### 4.6. Добавки в бетон

В бывшем ГДР летучая зола бурых углей использовалась, как составляющая при производстве цемента, а также, как добавка в бетон [9, 22]. Использование золы бурых углей при производстве бетона было основано на действии бывшего (восточного) стандарта Германии BS 50-0808 [23] по использованию летучей золы в бетонах, строительных растворах, с целью стабилизации и для специальных назначений, в которых свойства летучей золы должны отвечать требованиям бывшего (восточного) немецкого стандарта по использованию летучей золы TGL 190-72/03 «Электрические станции: твердые остатки сжигания бурых углей при пылеугольном сжигании на ТЭС; сухая зола, образованная на ТЭС - технические условия поставки» [24]. С воссоединением Германии в 1989 г. упомянутые стандарты были заменены стандартами DIN. Опыт использования золы бурых углей при производстве цемента и бетона на основе бывших стандартов не учитывался при разработке существующих стандартов DIN для цемента и бетона.

Согласно определению летучей золы в DIN EN 450 «Летучая зола для бетона» [25] зола бурого угля была исключена из этого применения, регулируемое этим стандартом, хотя ее свойства удовлетворяли критерию

по кремниевой золе. В Германии зола бурого угля может быть использована только как добавка в цемент при получении технического свидетельства со стороны Службы технического контроля строительства Германии. В 1990 г. Служба технического контроля строительства Германии выдала техническое свидетельство по использованию летучей золы бурого угля Лужицкого района в качестве добавки в бетон, которое регулярно продлевалось из-за непрерывного использования летучей золы этой ТЭС в бетонной промышленности [26]. При наличии этого технического свидетельства эксплуатирующий персонал стремится применить систему контроля качества, состоящую из непрерывного производственного контроля, осуществляемого производителем золы, и контроля качества летучей золы третьей Стороной, определенной с целью удовлетворения требований, предъявляемых к летучей золе для бетонов. Результаты постоянного производственного контроля подлежат мониторингу уполномоченным органом по сертификации.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2012 г. на ТЭС Германии, сжигающих бурые угли, было образовано около 8,7 млн т летучей золы, 1,7 млн т шлака и 5,7 млн т гипса установок сероочистки дымовых газов. Большая часть золы используется для заполнения и восстановления отработанных карьеров добычи бурого угля. Кроме того, зола используется в качестве наполнителя в асфальт, для закладки шахт, рекультивации земель, улучшения состава грунтов и в качестве добавки в бетон. Гипс установок сероочистки используется в гипсовой и цементной промышленности.

Использование продуктов сжигания угля зависит от их химического, минералогического состава и физических свойств. На эти свойства оказывают влияние технологии, применяемые на электростанции, месторождение угля, а также тип углеподачи. Зола бурых углей основных районов добычи угля в Германии имеет характерные химические свойства. Почти все золы бурого угля имеют в составе более 10 % реактивного оксида кальция по массе, и их можно охарактеризовать как известковые золы согласно DIN EN 197-1. Однако, летучая зола не отвечает всем требованиям стандарта DIN EN 197-1 и, следовательно, не соответствует этому стандарту.

Для всех указанных применений необходимо учитывать требования технических и экологических показателей в национальных или европейских предписаниях или стандартах. Необходимым условием использования золы бурых углей в различных направлениях, в которых требуются самотвердеющие свойства золы, а также при производстве вяжущих с применением цемента или без него, является постоянное качество продукции.

Большая часть золы, образовавшейся при сжигании бурых углей, используется для заполнения отработанных карьеров и шахт. В результате большого числа исследований использования золы в цементно-содержащих смесях было доказано, что зола бурых углей, образовавшаяся на ТЭС, сжигающих лигниты, может быть использована по-разному. В ходе многолетнего опыта использования золы в гидравлических вяжущих для дорожных работ были отмечены хорошие результаты после многих лет службы. Зола также регулярно используется для улучшения свойств грунтов, в дорожном строительстве и в качестве добавки в бетоны. Нижняя плита площадью 3000 м<sup>2</sup> была зацементирована СЕМ II-B (W-LL), произ-

веденным в рамках совместного научно-исследовательского проекта с участием производителя цемента.

В целом, зола бурых углей может быть использована при производстве строительных материалов и в строительной промышленности (при производстве цемента, бетона, штукатурки и строительных растворов, при строительстве дорог), а также в экологическом секторе (удержание загрязняющих веществ, рекультивация земель). На выбор областей применения золы оказывают влияние экономические аспекты, а также критерии, вытекающих из требований процедур квалификационных тестов, лицензирования и стандартизации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. **EURACOAL** – Coal industry across Europe 2011
2. **VGB PowerTech**: Statistics on Production and Utilisation of By-products from coal-fired power plants in Germany in 2010
3. **FGSV**: Merkblatt über die Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten im Straßenbau (code of practice for the use of power plant by-products in road construction), Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, M KNP 624, 2009
4. **Bundesberggesetz vom 13. August 1980** (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) [federal mining law dated 13.08.1990, latest revision in article 15 on 31.07.2009]
5. **Landfill Directive**: Council Directive (1999/31/EC) of 26 April 1999 on the landfill of waste
6. **Oster, A., Eyll-Vetter, M.**: Landfilling Technique and Management in the Rhenish Mining Area, Surface Mining, 53 (2001), No. 2, p. 167 – 176
7. **MUEG – Mitteldeutsche Umwelt und Entsorgung GmbH**: Soil improvement with calcareous fly ash, personal information, March 2012
8. **Swatek, St.**: Erfahrungen mit alternativen Bindemitteln bei der Bodenverbesserung auf der A72 (experience with alternative binders for soil beneficiation at A72), personal information, March 2012
9. **Igner, R.**: BFA als Zuschlagstoff für Zement; Verwertung von BFA in der Zementindustrie der ehemaligen DDR (lignite fly ash as constituent of blended cement; use of lignite fly ash in the cement industrie of the former GDR), Handbuch der Verwertung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, Herausgeber: RWE AG, Zentralbereich Forschung und Entwicklung, Essen, S. 295 – 322
10. **DIN EN 197-1**: Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements; German version EN 197-1:2011, 11/2011
11. **RWE AG**: Handbuch der Verwertung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland (guidance for utilisation of lignite fly ash in Germany), 1995
12. **Forschungsinstitut der Zementindustrie**: Verwertung von Braunkohlenflugasche in der Zement-industrie (use of calcareous fly ash in the cement industry), Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) Nr. 12398 N/I.3, 2002
13. **Forschungsinstitut der Zementindustrie**: Ökologisch und technisch optimierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen (ÖkotopZement) (ecologically and technically optimised cements with several constituents, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Nr 3.1 BNBest – BMBF 98 (01LK0502), 2009
14. **Müller, C., Severins, K.**: Neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen (new findings regarding the performance of cements with several constituents), beton 10/2009 and 11/2009
15. **Feuerborn, H.-J., Miskiewicz, K., vom Berg, W., Zabel, P.**: Charakteristische Stoffeigenschaften von Braunkohlenflugaschen im Hinblick auf ihre Eignung als

- Hauptbestandteil von Zement (characteristics of lignite fly ash for use as cement constituent), 15. International Baustofftagung, ibausil 2003, Tagungsband 1, S. 402-414
16. **Feuerborn, H.-J., Ludwig, U., Urbonas, L.:** Verwertung von ost- und mitteldeutschen Braunkohlenflugaschen (BFA) in Bindemitteln (use of calcareous fly ash in binders), 14. Internationale Baustofftagung, ibausil 2000, Tagungsband 2, S. 1151-1163
  17. **MUEG** – Mitteldeutsche Umwelt und Entsorgung GmbH, personal information, March 2012
  18. **Zabel, P.:** Stoffliche Charakterisierung von Braunkohlenfilteraschen und Erfahrungen bei der Verwertung in der Bauwirtschaft (characterisation of lignite fly ash and experience in use in the construction industry), VGB Kraftwerkstechnik 74 (1994), H. 12, S. 1086–1091
  19. **Hörmeier, H., Spiekermann, F.:** Erd- und Straßenbau (earth works and road construction), Handbuch der Verwertung von Braunkohlenfilteraschen in Deutschland, Herausgeber: RWE AG, Zentralbereich Forschung und Entwicklung, Essen, S. 433 – 450
  20. **BMVBS/BAST:** Eignung von Gemischen für hydraulisch gebundene Tragschichten nach Europäischer Norm für Anwendungen in Deutschland“ (suitability of mixtures for hydraulically bound base courses according to European codes for applications in Germany), Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMV) vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), 2008
  21. **Feuerborn, H.-J., Weingart, W.:** Calcareous fly ash in Hydraulic Road Binders - Long term observation on existing roads versus laboratory test -, 2nd Hellenic Conference on Utilisation of industrial By-Products in Construction, Aiani Kozani/Greece, 2009
  22. **Siebert, P., Fischer, H.-J., Kambor, H.-U., Zander, B.:** Anwendung von Flugasche für Mörtel und Beton (use of fly ash for mortar and concrete), Betontechnik 43(1984), H. 4, S. 120-122
  23. **BS 50-0808:** Fly ash for concrete, mortars, stabilisation and special masses, 1987 (withdrawn in 1990 due to reunification)
  24. **TGL 190-72/03:** Electric Power Stations: Solid Combustion Residues of Electric stations firing pulverized brown coal; Electric power stations produced dry ash – technical terms of delivery, 1983 (withdrawn in 1990 due to reunification)
  25. **EN 450: Fly ash for concrete** - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria, German version EN 450-1:2005)
  26. **Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT):** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (national technical approval), Braunkohlenflugasche (lignite fly ash) „Jäwament E/F (BFA)“ des Kraftwerkes (power station) Jänschwalde, Blöcke E und F, Vattenfall Europe Generation GmbH & Co.KG, Z-3.39-1370, 2008
- Х.-Й. Фюерборн, Б. Мюллер, Э. Вальтер.** Пути Использование кальциевой летучей золы в Германии // Материалы Международной конференции “Eurocoalash 2012”, Салоники, Греция, 25–27 сентября 2012 г.