

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ

О.В. АФАНАСЬЕВА *, Г.Р. МИНГАЛЕЕВА *, А.Д. ДОБРОНРАВОВ **,
Э.В. ШАМСУТДИНОВ ***

*КазНЦ РАН

**ОАО «Генерирующая компания»

***Казанский государственный энергетический университет

В работе представлен обзор основных тенденций комплексного использования золошлаковых отходов, образующихся на угольных станциях. Рассмотрены состав золошлаковых отходов, методы выделения из них ценных компонентов и отмечены основные области их дальнейшего использования. Приведены результаты анализа остаточного углерода, азота и минеральной части золы и шлака с Кировского и Московского золоотвалов Казанской ТЭЦ-2 и определены перспективные направления их последующей утилизации.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, утилизация, комплексное использование, редкие и цветные металлы, цеолиты, минеральные удобрения.

Современные тенденции в развитии промышленного производства диктуют необходимость на стадии проектирования объектов энергетики стремиться к минимальным показателям по выбросу вредных веществ. Экологическая составляющая для энергетических объектов, работающих на угольном топливе, к сожалению, до сих пор так и остается "слабой стороной", что препятствует более широкому использованию твердого топлива. Вместе с тем, разработаны и нашли практическое применение многие технологии, позволяющие снизить долю вредных веществ, поступающих в атмосферу, и приблизить выбросы от данных объектов к "нулевым" значениям. Однако только этим проблемы, связанные с использованием твердого топлива, не ограничиваются. На сегодняшний день в России объем накопленных золошлаковых отходов (ЗШО) составляет порядка 1300 млн. тонн, а площадь земельных участков, загрязненных золоотвалами, – более 22 тысяч га [1]. Низкая доля утилизации ЗШО в нашей стране, обусловленная многими факторами, приводит к тому, что золошлакоотвалы становятся потенциальными объектами загрязнения окружающей среды. Одновременно присутствие в составе ЗШО ценных компонентов создает несомненные предпосылки для их комплексной переработки, и в этом случае хранилища должны быть отнесены к категории техногенных сырьевых запасов отложенного спроса.

Ввиду того, что в советские времена вопросы экологической безопасности не стояли так остро, практически на всех станциях, работающих на твердом топливе, проектировались гидравлические системы золошлакоудаления, которые не позволяют в полной мере использовать все ценные качества золошлакового материала. Однако применение различных методов выделения ценных компонентов из золошлакоотвалов с их последующей утилизацией в качестве промышленно значимого сырья позволит решить данную проблему.

В этой связи целью данной работы является систематизация сведений по способам утилизации и комплексному использованию золошлаковых отходов на основании определения их минерального состава для минимизации негативного

воздействия на окружающую среду энергетических объектов, работающих на твердом топливе.

В качестве основных направлений утилизации ЗШО можно выделить следующие:

- производство строительных материалов;
- производство концентратов металлов;
- производство глинозема, сульфата или хлорида алюминия;
- производство сплавов (ферросилиций, ферроалюмосилиций).

Уровень утилизации золошлаковых отходов в России составляет 4 %, из которых 30% ЗШО применяется при нейтрализации кислых почв, 0,2% – для производства химических удобрений, 0,02% – для извлечения редких элементов, остальное количество используется в производстве строительных материалов [2].

Следуя современным тенденциям и предопределяя перспективы, особый интерес, на наш взгляд, представляет выделение из золы и шлака ценных соединений, в том числе редких металлов, микроэлементов, алюмосиликатных микросфер и других компонентов. Однако оценка направлений комплексного использования золошлаковых отходов возможна только после изучения состава их минеральной части, что и является задачей данного исследования. В качестве примера в табл. 1 представлен химический состав золы и шлака, полученных при газификации угля на станции *Puertolanno* в Испании и в результате сжигания на Томь-Усинской ГРЭС [3, 4].

Таблица 1

Состав золы и шлака при сжигании и газификации

Компонент	Зола при газификации (Испания), %	Шлак при газификации, (Испания) %	Зола при сжигании, (Россия) %
SiO ₂	56,47	55,12	60,00-65,00
Al ₂ O ₃	24,13	28,20	21,32-21,94
Fe ₂ O ₃	3,99	5,77	3,54-7,25
MnO	0,03	0,05	0,04-1,2
MgO	0,68	0,93	1,51-2,00
CaO	3,64	6,04	1,52-4,93
Na ₂ O	0,70	0,40	0,92-0,95
K ₂ O	4,05	2,38	2,50-3,24
TiO ₂	0,54	0,76	0,79-0,84

Зола и шлак не являются однородными химическими соединениями и представляют собой гетерогенные смеси различных минеральных образований, состоящие из кристаллических и стекловидных частей. В золе углей можно выделить следующие классы минеральных примесей:

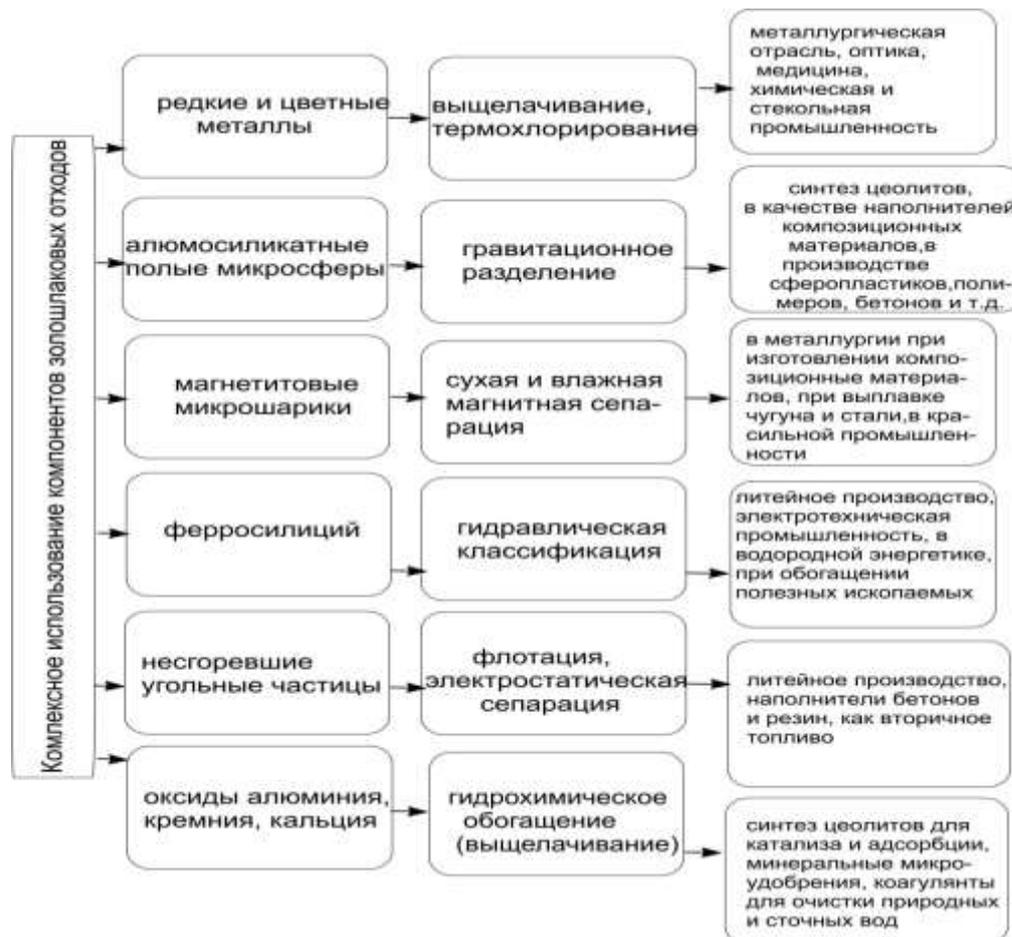
- 1) биогенный (Mn, Co, Mo);
- 2) сорбционный (Ca, Al, Mg, Fe);
- 3) конкреционный (CaCO₃, MgCO₃, FeS₂, Al₄[Si₄O₁₀](OH)₈);
- 4) терригенный (кварц, полевой шпат, слюда, глина, апатит, циркон);
- 5) инфильтрационный (сульфиды металлов).

В качестве компонентов, которые входят в состав золошлаковых отходов и имеют перспективное значение, выбраны следующие:

- редкие и цветные металлы;
- алюмосиликатные микросферы;
- магнетитовые микрошарики;
- ферросилиций;
- несгоревшие угольные частицы;

- оксиды кремния, алюминия.

На рис. 1 показаны основные ценные компоненты, входящие в состав золошлаковых отходов, методы их переработки и последующего использования.



Редкие и цветные металлы

Золошлаковые отходы являются перспективной минерально-сырьевой базой ценных металлов, таких как Y, Sr, Zr, Ga, V и многих других (табл. 2). Согласно прогнозам мировое потребление цветных металлов каждый год увеличивается на 2,5–3%, черных – на 2%.

В настоящее время потребности России в цветных и редких металлах, таких как Ti, Ta, Nb, Zr, обеспечиваются в основном за счет импорта [5]. После распада в 1990 году Советского Союза производство ценных металлов практически прекратилось. Однако к 2020 году, согласно заявлению Министерства промышленности и торговли, Россия планирует полностью отказаться от импорта редкоземельных металлов, обеспечивая тем самым свои потребности только за счет внутреннего производства [6]. В этой связи пристальное внимание будет уделяться как разработке месторождений, так и развитию различных технологий выделения ценных металлов из имеющегося сырья.

Учитывая, что некоторые редкие металлы, такие как Sc, Ga, не имеют собственных рудных месторождений и их производство связано с переработкой руд других металлов (Pb, Zn, Cu, Al), то такие нетрадиционные источники редких металлов, как ЗШО, будут приобретать особую актуальность. Кроме того, учитывая высокие

цены на металлы на мировом рынке, при сравнительно невысокой себестоимости их лабораторного извлечения из ЗШО, можно предположить, что производственная себестоимость выделения металлов будет не выше традиционных методов их получения.

В табл. 2 приведены рядовые содержания металлов в рудах и минимально-промышленные содержания ценных металлов в золе, которые позволяют оценить их как промышленно значимые, т.е. перспективные для использования в качестве сырья вместо природного [7].

Таблица 2

Содержание металлов в рудах и угольной золе

Элемент	Среднее содержание элементов в рудах, г/т	Ориентировочное минимальное содержание в золе, г/т
Be	BeO: 100-320 и выше	BeO: 100, Be - 36
Sc	72,65 (в бокситах)	73
V	V ₂ O ₅ : 400-1200 (в бокситах)	V ₂ O ₅ : 400
Ga	19,08-53,78 (нефелиновые, апатит-нефелиновые руды, бокситы)	19,08-54
Zr	ZrO ₂ : 900 (пироклоровые)	ZrO ₂ : 900
Nb	Nb ₂ O ₅ :100-3700	Nb ₂ O ₅ : 100
Mo	100- штокверковые руды с попутным молибденом	100
Ag	комплексные серебро-содержащие: медно-молибденный тип - 0,2; вольфрамовый - 1,0; молибденный -2,9; медистые песчаники и сланцы - 10	0,2
Cs	Cs ₂ O: апатит-нефелиновые - 0,98; слюдитовые и кварц-плагиоклазовые жилы -386,36; среднее значение по разным типам руд - 22,58	Cs ₂ O: 2,5-22,6
W	WO ₃ : в россыпных месторождениях - 94 г/м ³ ;	WO ₃ - 94 г/м ³ ; W- 35 (75 г/м ³)
	WO ₃ : минерализованные зоны с попутным вольфрамом - 550	WO ₃ -550; W- 440
U	в россыпных месторождениях 93,65 г/м ³	40
Au	в россыпных месторождениях для открытой разработки 0,7 г/м ³	0,12
Pt	платино-золотоносные россыпи - 0,029 г/м ³ ; золотоносные с содержанием платины - 0,008 г/м ³	0,004-0,014 (0,008-0,029 г/м ³)
Ti	в ильменит-титаномagnetитовых и россыпных 3600 - 383000 [8]	7000-9000

Для извлечения металлов из золошлаковых отходов используются такие методы, как выщелачивание, термохлорирование. Так, с помощью выщелачивания можно извлечь Au, Li, V, Y, редкоземельные и ряд других металлов. Ряд полиметаллов (Cu, Pb, Zn) могут извлекаться из золы только в комплексе с редкими металлами. Из бурых углей можно извлечь 40–67% Ti, 45–77% Be, 70–87% Cu, 50–81% Mn, 74–84% As, 48–60% V и 62–83% Ga [5]. В промышленном же масштабе из углей и углеотходов на сегодняшний день извлекаются только Ge и Au.

Извлеченные концентраты металлов могут найти применение в металлургической отрасли, оптике, медицине, химической и стекольной промышленности.

Алюмосиликатные микросферы

Алюмосиликатные полые микросферы образуются в результате грануляции расплава минеральной части твердого топлива. При переработке топлива в потоке газа расплав дробится на отдельные капли, размер которых возрастает за счет увеличения объема газа внутри них. При равенстве сил поверхностного натяжения капли и внутреннего давления газа происходит образование газовых пузырьков – алюмосиликатных микросфер.

Основными минеральными компонентами алюмосиликатных микросфер являются муллит, кварц, полевой шпат, гепатит, магнетит, гидрослюда, оксид кальция. Химический состав алюмосиликатных микросфер углей различен, однако к преобладающим компонентам относятся алюминий, кремний, железо, магний, калий. Газовая фаза внутри пузырьков микросфер состоит в основном из азота, кислорода, оксида углерода и водяного пара. Плотность микросфер в среднем составляет 600 кг/м³, диаметр от 20 до 200 мкм, форма близка к сферической.

Являясь дисперсным материалом, который обладает меньшей, по сравнению с другими компонентами золошлаковых отходов, плотностью, алюмосиликатные микросферы всплывают в воде, что позволяет проводить их выделение на золоотвале путем гравитационного разделения. Однако на поверхности воды (первые 20–30 часов) помимо алюмосиликатных микросфер могут находиться также частицы недожога, которые отделяют методом флотации и только потом применяют гравитационное разделение. В качестве устройств при данном способе разделения могут выступать лотки, радиальные сгустители, декантаторы, гидроциклоны, а также устройства комбинированного типа. Ввиду высоких капитальных затрат технологических схем с использованием данных устройств, может быть применен способ выделения алюмосиликатных микросфер с использованием гидротехнических устройств самого золоотвала. После отделения микросфер их складывают для снижения влажности, пропускают через сито, сушат до определенной влажности (около 3%) и рассеивают по фракциям.

Перспективное использование алюмосиликатных микросфер связано с их способностью выполнять роль неорганического наполнителя, что позволяет снизить плотность материала, повысить его прочность, улучшить тепло-, электро- и звукоизоляционные свойства. Микросферы могут быть использованы при производстве термопластичных сферопластиков, дорожно-разметочных термопластиков (при замене аэросила), в качестве наполнителей теплоизоляционных радиопрозрачных и облегченных строительных керамик (взамен песка), тампонажных материалов и буровых растворов, теплоизоляционных жаростойких бетонов и безобжиговых материалов.

Магнетитовые микрошарики (железосодержащие микросферы)

Магнетитовые микрошарики образуются при высокой температуре в результате термохимических преобразований сульфидов, силикатов и карбонатов железа, которые входят в состав минеральной части углей. Минеральный состав микрошариков включает в себя магнетит, маггемит и гематит, основным же компонентом химического состава магнетитовых микрошариков является железо (более 60%). В значительно меньшем количестве присутствует алюминий, кремний, кальций, фосфор и другие элементы. Помимо этих элементов в них содержатся элементы-примеси: Sr, Cr, Co, Ni, Mo, Ba, Hg.

Диаметры микрошариков колеблются от нескольких единиц до 300 мкм, плотность в среднем составляет 3200 кг/м³.

Благодаря магнитной восприимчивости и более высокой плотности, по сравнению с остальными компонентами золошлаковых отходов, извлечение их из золы

может проводиться более эффективно. Выделение магнетитового концентрата из золы возможно путем проведения сухой или влажной магнитной сепарации либо последовательном проведении этих двух процессов.

Благодаря своим свойствам, магнетитовые микрошарики могут быть использованы при выплавке чугуна и стали, ферросплавов, в качестве утяжелителя минеральной суспензии при обогащении, в красильной промышленности, при производстве специальных бетонов, в металлургической промышленности при изготовлении композиционных материалов и магнитопроводов, получении природно-легированного концентрата железа.

Ферросилиций

Ферросилиций присутствует в составе шлака в системах с жидким шлакоудалением при переработке антрацитов и малореакционных каменных углей марки Т. Несгоревшие угольные частицы переходят в расплавленный шлак и создают локальные восстановительные зоны, где происходит образование ионов железа, которые, в свою очередь, при взаимодействии с кремнием образуются гранулы ферросилиция. Минералогический состав ферросилиция представляет собой легированный кремнием раствор α -железа с примесью силицидов железа и карбидов кремния. Химический состав зависит от крупности частиц и включает в себя Fe, Si, C, Al, P, S. Среди элементов-примесей можно выделить значительное содержание Cr, Co, Ni, Zn, As, Se, W, Ta.

Плотность гранул ферросилиция составляет в среднем 6000 кг/м^3 . Размеры и форма частиц ферросилиция разнообразна. Частицы размером до 10 мм могут иметь шаровидную, эллипсоидную, каплевидную и лепешковидную формы; если размер более 10 мм, то форма частиц напоминает угловатые куски неправильной формы. Также можно встретить частицы пластинчатой, нитевидной дендритовидной форм.

Извлечение гранул ферросилиция может осуществляться с использованием металлоуловителей, работающих по принципу гидравлической классификации материалов с различной плотностью.

Основными областями применения ферросилиция являются литейное производство, электротехническая промышленность, также используются в водородной энергетике, при обогащении полезных ископаемых, при получении специальных тяжелых бетонов.

Несгоревшие угольные частицы

Несгоревшие угольные частицы представляют собой механический недожог топлива и содержатся в золе-уносе малореакционных каменных углей и антраците. Их содержание в золе может достигать 30–40%, ввиду чего их извлечение значительно сокращает массу золошлаковых отходов и площадь самих золошлакоотвалов.

Частицы имеют в основном остроугольную форму с неровными краями и по составу идентичны с составом используемого при переработке топлива. Минеральные примеси в основном представлены глиной, иногда пиритом. В отличие от исходного топлива в них наблюдается увеличение зольности и содержания углерода, соответственно, уменьшение выхода летучих веществ, водорода и серы.

Одним из основных методов выделения несгоревших угольных частиц из золы-уноса является флотация с применением различных флотореагентов. Данный метод основан на различии в смачиваемости несгоревших угольных частиц и других компонентов золошлаковых отходов и используется как при сухом, так и при жидком золошлакоудалении. Также для выделения угольных частиц из сухой золы-уноса может быть применен метод электростатической сепарации.

Основные области применения несгоревших угольных частиц – литейное производство (в качестве заменителя графита), а также они используются как наполнители бетонов и резин [9].

Оксиды алюминия, кремния, железа

Содержание в золе оксидов алюминия, кремния и железа определяет перспективы ее использования как источника для получения глинозема, железистого концентрата, а также цеолитов. При синтезе цеолитов на начальном этапе проводится химическое обогащение золы раствором щелочи с образованием силикатного раствора и обогащенного по алюминию концентрата [10].

Для решения поставленной задачи был исследован состав ЗШО, поступивших с Казанской ТЭЦ-2 на Московский и Кировский золошлакоотвалы (рис 2. а, б).



Рис. 1. Основные компоненты и методы переработки ЗШО



Рис. 2. Золошлакоотвалы Казанской ТЭЦ -2
а) Московский; б) Кировский

Установленная мощность Казанской ТЭЦ-2 составляет 410 МВт, тепловая – 1391 Гкал/час (в том числе КТЭЦ-2 – 851 Гкал/ч, РК «Савиново» – 540 Гкал/ч), уголь используется в качестве резервного топлива (Кузнецкий уголь марки Т) [11].

В табл. 3 приведен расход угля и выход золошлакового материала за 2001-2014 гг. На электростанции удаление золы и шлака на золошлакоотвал осуществляется напорной системой гидрозолоудаления от багерной насосной [12].

Таблица 3

Расход угля и ЗШО на Казанской ТЭЦ-2 за 2001-2014 гг [12]

Год	Расход угля, т условного топлива	Выход шлака, т/год	Выход золы, т/год	Золошлаковый материал, т/год
2001	50834	7293,9	2495,8	9789,7
2002	30862	2843,2	1114,8	3958
2003	34780	5156,9	1760,9	6917,8
2004	7970	1140,9	372,9	1513,8
2005	3733	556,1	180	736,1
2006	76712	13353,4	4274,3	17627,7
2007	9939	1862,8	603	2465,8
2008	9931	1825,7	597,8	2423,5
2009	5200	936,7	305,9	1242,6
2010	6415	1281,4	409,65	1691,05
2011	6271	1267,6	409,8	1677,4
2012	-	-	-	-
2013	564	71,3	24,1	95,4
2014	245	30,9	10,4	41,3

На рис. 3 показан план системы золошлакоудаления Казанской ТЭЦ-2 и указаны места отбора проб на Кировском и Московском золошлакоотвалах.

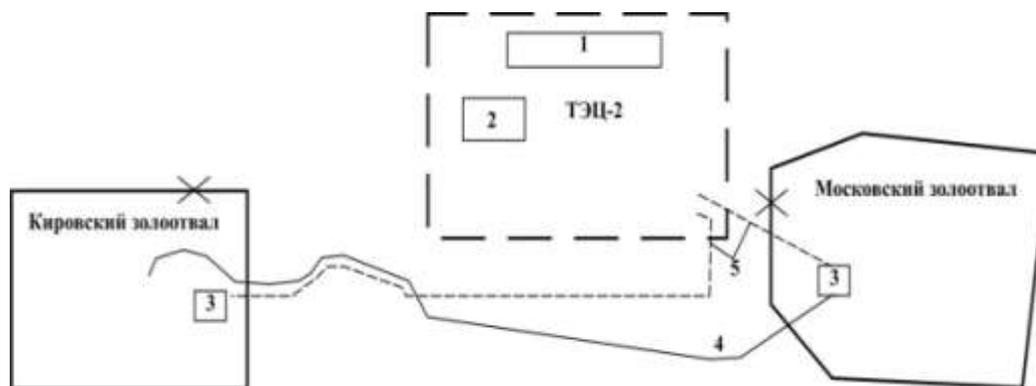


Рис. 3. План системы золошлакоудаления Казанской ТЭЦ-2:

1 – машинный цех; 2 – новая котельная; 3 – плавучие станции; 4 – золошлакопровод; 5 – трубопроводы осветленной воды; × – место отбора проб

В табл. 4 представлена характеристика отобранных проб. После золошлакоотвала все образцы были высушены в сушильном шкафу ШСЛ-43/250В и рассеяны по фракциям на ситовом анализаторе А30. Более крупные пробы перед рассеиванием предварительно были измельчены в планетарной шаровой мельнице Активатор -2SL.

Таблица 4

Характеристика проб с золошлакоотвалов Казанской ТЭЦ-2

№ пробы	Характеристика пробы
1	Московский золошлакоотвал, фракция 0,05 мм, предварительно измельченная
2	Московский золошлакоотвал, фракция 0,125, предварительно измельченная
3	Кировский золошлакоотвал, фракция 0,05 мм, предварительно измельченная
4	Московский золошлакоотвал, фракция < 0,05 мм
5	Московский золошлакоотвал, фракция 0,125 мм
6	Кировский золошлакоотвал, фракция 0,05 мм
7	Московский золошлакоотвал, фракция < 0,05 мм, предварительно измельченная
8	Московский золошлакоотвал, фракция 0,05 мм
9	Кировский золошлакоотвал, фракция < 0,05 мм
10	Кировский золошлакоотвал, фракция 0,125 мм

Для анализа были использованы фракции размером 0,125 мм, 0,5 мм и менее 0,05 мм. Состав золошлаковых отходов был определен на энергодисперсионном флуоресцентном рентгеновском спектрометре EDX-800HS2 производства "Shimadzu". Результаты анализа представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты анализа проб ЗШО Казанской ТЭЦ-2

№ пробы	Содержание компонент., % (масс.)		Содержание компонентов в минеральной массе, % (масс.)									
	N	C	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Sr	Ba
1	0,24	2,31	27,1	64,4	0,3	1,2	2,1	0,3	0,1	4,3	сл.	0,1
2	0,18	2,29	27,0	63,8	0,3	1,2	2,3	0,3	0,1	4,6	сл.	0,1
3	0,08	1,02	28,0	64,8	-*	1,3	1,5	0,3	0,1	3,8	сл.	0,2
4	0,32	14,41	22,4	41,8	2,1	1,1	26,8	0,3	0,1	5,2	0,1	-
5	0,42	23,96	16,9	32,2	2,5	0,7	36,4	0,3	0,1	5,1	0,1	-
6	1,07	27,00	28,4	56,4	0,8	1,3	8,9	0,4	0,1	3,7	сл.	-
7	0,71	3,84	26,6	63,1	0,4	1,3	2,9	0,4	0,1	5,1	сл.	-
8	0,77	21,77	20,6	36,8	2,7	0,9	34,0	0,3	0,1	4,6	0,1	-
9	0,73	11,17	29,2	55,7	0,5	1,4	8,9	0,4	0,1	3,8	сл.	-
10	0,77	21,45	28,2	57,0	0,8	1,4	8,3	0,2	0,1	3,6	сл.	0,4

* - не обнаружено

В результате анализа в пробах № 1, 2, 3, 5 и 7 были обнаружены следы хрома, в образцах № 4–10 следы меди; следы ванадия содержатся в пробе № 7, следы цинка в пробах № 4–6, 8–10, следы циркония в образцах № 1, 3 и 5. Помимо этого в образце № 5 был обнаружен фосфор (5,7%).

Как видно из табл. 5, наибольшее содержание остаточного углерода наблюдается в пробах № 5, 6, 8 и 10. Все эти образцы были взяты в непосредственной близости от труб, по которым золошлаковые отходы поступают в золошлакоотвал. Высокое содержание кремния >60% отмечено в образцах № 1–3 и 5. По содержанию алюминия наибольшие значения > 25% у проб № 1–3, 6, 7, 9 и 10. В образцах № 4, 5 и 6 отмечено высокое содержание кальция (>26%). Содержание титана во всех пробах составляет

0,3–0,4 %, что соответствует промышленно значимой концентрации в рудах и свидетельствует о возможности извлечения из ЗШО Казанской ТЭЦ-2.

Таким образом, изучив состав ЗШО Казанской ТЭЦ-2, можно заключить, что основными перспективными направлениями утилизации, помимо строительной отрасли, могут стать извлечение из них титана, синтез цеолитов из алюмосиликатных составляющих золы и шлака, а также использование в сельском хозяйстве в качестве минеральных удобрений, содержащих кремний, марганец и калий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-00333 «Разработка физико-химических основ создания высокоэффективных ресурсосберегающих технологических схем утилизации золошлаковых отходов энергетических объектов»).

Summary

In the article an overview of the main direction of complex use ash and slag waste from coal-fired stations was provided. The composition of ash waste, methods of isolation of valuable components and the key areas of their further using were noted. The results of the analysis of residual carbon, nitrogen and mineral part of ash and slag from the Kirov and Moscow ash dumps of Kazanskaya heat and power station - 2 were shown and perspective directions their utilization were determined.

Keywords: ash and slag waste, utilization, multiple use, rare and non-ferrous metals, zeolites, mineral fertilizers.

Литература

1. Таскин А.В., Слесаренко В.В. Технологические аспекты утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций / Сборник научных работ II международной научной конференции Евразийского Научного Объединения (г. Москва, февраль 2015). М. : ЕНО, 2015. 350 с.
2. Ксинтарис В.Н., Рекитар Е.А. Использование вторичного сырья и отходов в производстве. М.: Экономика, 1983. 167 с.
3. M. Aineto, A. Acosta, J. Ma. Rincon, M. Romero. Thermal expansion of slag and fly ash from coal gasification in IGCC power plant // Fuel. 2006. 85. P. 2352-2358.
4. Соловьев Л.П., Пронин В.А. Утилизация зольных отходов тепловых электростанций // Modern high technologies. 2011. №3. С. 40-42.
5. К 2020 году Россия откажется от импорта редкоземельных металлов. 2013. URL: <http://rostec.ru/news/3323> (дата обращения: 20.07.2015).
6. Салихов В.А. Перспективы извлечения ценных цветных и редких металлов из золошлаковых отвалов энергетических предприятий Кемеровской области. // Экономика. 2009. Июль. С. 163-168.
7. Ценные и токсичные элементы в товарных углях России. Справочник / Ю.Н. Жаров, Е.С. Мейтов, И.Г. Шарова и др. М.: Недра, 1996. 239 с.
8. Сырьевая база для производства титана. 2015. // URL: <http://metal-archive.ru/osnovy-metallurgii/1643-syrevaaya-baza-dlya-proizvodstva-titana.html> (дата обращения: 20.07.2015).
9. Кизильштейн Л.Я. Полезная зола // Химия и жизнь. 2011. №3. С. 26-27.
10. Мылтыкбаева Л.А. Технология получения цеолитов из зол ТЭЦ // Энерготехнологии и энергосбережение. 2009. №6. С. 49-52.
11. Официальный сайт ОАО Генерирующая компания. URL: <http://www.tatgencom.ru/operations/> (дата обращения: 20.07.2015).
12. 2-ТП. Отходы. Форма статистической отчетности Казанской ТЭЦ-2.

Поступила в редакцию

06 августа 2015 г.

Афанасьева Ольга Валерьевна – канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории моделирования систем производства энергии (МСПЭ) Казанского научного центра РАН. Тел: 8(960)0512555. E-mail: eccolga@mail.ru.

Мингалева Гузель Рашидовна – д-р техн. наук, зав. лабораторией моделирования систем производства энергии (МСПЭ) Казанского научного центра РАН. E-mail: mingaleeva-gr@mail.ru.

Добронравов Александр Дмитриевич – заместитель начальника производственно-технического управления ОАО «Генерирующая компания». E-mail: dobronravovad@tatgencom.ru.

Шамсутдинов Эмиль Васильевич – канд. техн. наук, проректор по НР Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: kgeunr@mail.ru.