

Русанов И. Ф., *Куберский С. В., Проценко М. Ю, Кононенко Г. И.

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: Skuberskiy@yandex.ru*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТОДАМИ ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ

Сделан анализ работы ТЭС России и народных республик Донбасса. Приведены состав золы ТЭС Донбасса, существующие направления их переработки. Предложено для извлечения полезных компонентов из золы использовать метод металлотермического восстановления.

Ключевые слова: зола ТЭС, состав золы, использование золы, металлотермическое восстановление, ферросилиций.

По данным British Petroleum, опубликованным в ежегодном Статистическом обзоре мировой энергетики 2023 (Statistical Review of World Energy 2023), в 2022 году в мире было выработано 29165,1 тераватт-часов (ТВт·ч) электроэнергии, в том числе странами Евросоюза — 2812 ТВт·ч (9,6 %) [1].

Россия входит в пятерку крупнейших в мире стран производителей электроэнергии (табл. 1).

В 2022 году основная доля всей электроэнергии в мире (60,6 %) выработана на тепловых электростанциях, а в странах Евросоюза — 37,7 %.

При этом ТЭС, работающие на нефти, выработали 728,8 (2,5 %), газе — 6531,4 (22,7 %) и угле — 10317,2 (35,4 %) ТВт·ч.

Мировым лидером по числу ТЭС, работающих на угле, является Китай (табл. 1). Он потребляет около половины мирового объема энергетического угля, а доля угольной генерации в стране превышает 70 % [2].

В единой энергетической системе России тепловые электростанции (ТЭС и ТЭЦ) также несут основную нагрузку по обеспечению спроса на электроэнергию. При их общей установленной мощности, равной 167 тыс. МВт (без учета мощностей электростанций Донбасса), они генерируют около 62,5 % от общего количества вырабатываемой электроэнергии. Основная масса тепловых электростанций работают на природном газе (около 73 %) и только 16 % — на угле (табл. 1).

В народных республиках Донбасса практически вся электроэнергия вырабатывается тепловыми электростанциями, работающими на местных энергетических углях марок ГСШ, АШ, Т и Г.

Удельный расход условного топлива (топлива при сгорании 1 кг которого выделяется 29,3 МДж или 7000 ккал тепла) при отпуске электрической энергии с учетом комбинированного производства электрической и тепловой энергии составляет около 300 г у.т./кВт·ч. Теплота сгорания используемых углей находится в пределах 22–27 МДж/кг, и поэтому фактический расход топлива составляет 325–400 г у.т./кВт·ч.

Так как уголь обязательно содержит в своем составе негорючие минеральные примеси (золу), его сжигание неизбежно приводит к образованию зольных отходов. Несмотря на предварительное обогащение угля, содержание золы в нем остается значительным.

Таблица 1

Количество выработанной за 2022 год электроэнергии [1]

№ п.п.	Страна	Выработка		На угле	
		ТВт·ч	%	ТВт·ч	%
1	Китай	8848,7	30,3	5397,8	61
2	США	4547,7	15,6	904,2	20
3	Индия	1858,0	6,4	1380,1	74
4	Россия	1166,9	4,0	192,3	16
5	Япония	1033,6	3,5	309,0	30

Регламентируемая ГОСТ 32347-2013 зольность (содержание негорючих примесей) может составлять от 13 до 40 %, а средняя — 25 % [3], то есть из тонны угля образуется в среднем 250 кг золы.

Не весь уголь сгорает, и в зависимости от технологического процесса сжигания часть угля остается в золе в виде недожога (потери массы при прокаливании). Высокая степень недожога невыгодна для электростанций, но полностью сжигать уголь тоже не получается — для зол разных видов углей нормативные показатели по недожогу составляют от 2 до 24 %, причем значения 2–3 % зачастую достигаются путем предварительной подготовки золы уноса к использованию.

Образующиеся на ТЭС техногенные отходы называют золошлаковыми отходами (ЗШО).

Мировое производство электроэнергии ТЭС всего мира сопровождается образованием 200–250 млн т ЗШО.

В России ежегодно образуется 25–30 млн т ЗШО, а общий их накопленный объем оценивается в 1,5–2 млрд т. Они занимают площадь порядка 28 тыс. га, что сопоставимо с территорией таких городов, как Иркутск, Красноярск или Томск [4].

При годовой выработке ТЭС республиками Донбасса 25 млрд кВт·ч электроэнергии образуется около 1,5 млн т золы.

Во многих странах утилизации образованных отходов топливно-энергетического комплекса уделяется большое внимание. В США и Великобритании утилизируется около 60 %, во Франции и Германии — 70 %, в Финляндии — 84 %, а в Нидерландах и Дании и вовсе 100 %, в Японии — практически 100 % текущего выхода ЗШО [5].

Использование отходов топливно-энергетического комплекса осуществляется в различных направлениях [6–13]. Их подробное описание сделано в работе [14].

Особого внимания заслуживают работы по разработке технологий комплексной переработки ЗШО, позволяющие получить различные виды товарной продукции на

основе железа, алюминия, титана и других элементов, выделить редкоземельные металлы и даже золото [15, 16].

Перспективными технологиями комплексного извлечения из золы ТЭС полезных компонентов могут рассматриваться такие, которые основаны на пирометаллургическом восстановлении оксидов. Однако таким технологиям пока уделяется мало внимания. В результате даже их теоретическое обоснование отсутствует.

В связи с этим *целью* работы являлось проведение анализа возможности комплексной переработки ЗШО способами пирометаллургии.

Объект исследования — золошлаковые отходы ТЭС Донбасса.

Предмет исследования — теоретические основы комплексной переработки ЗШО при высоких температурах.

Задачи исследования:

– оценка возможности использования ЗШО в качестве заменителя природных материалов в существующих восстановительных высокотемпературных металлургических процессах;

– исследование механизма алюмотермического восстановления железа и кремния ЗШО в присутствии твердого углерода.

Изложение материала. Химический состав ЗШО определяется главным образом видом топлива, а также технологией его подготовки и сжигания.

В энергетических углях Донбасса содержание золы в пересчете на сухую массу составляет 17–23 % [16]. Основными компонентами ЗШО являются оксиды SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (50–58, 18–25 и 11–17 % соответственно) и незначительное содержание CaO , MgO (по 1,5–3,0 %), TiO_2 (около 1,0 %), щелочей Na_2O , K_2O , пятиоксида фосфора P_2O_5 и серы (в сумме 3–5 %). В малых количествах (иногда меньше грамма на тонну) в зависимости от свойств сжигаемого угля содержатся практически все элементы таблицы Менделеева: щелочные и щелочноземельные металлы, различные переходные металлы (в том числе ценные, ред-

МЕТАЛЛУРГИЯ

кие и редкоземельные), кларки которых позволяют рассматривать их в качестве подлежащих извлечению (табл. 2).

Состав ЗШО разнообразен и неоднороден. Он существенно зависит от состава поставляемого угля, района его добычи и метаморфизма [15]. В связи с этим для выбора процесса комплексной переработки ЗШО необходим тщательный предварительный анализ.

Первостепенной задачей анализа является установление в каком пирометаллургическом процессе и в качестве какого природного сырьевого материала может использоваться ЗШО.

Поскольку химический состав ЗШО представлен в основном оксидами, процесс должен быть восстановительным.

Простой перерасчет показывает, что в золе среднего состава содержится около 10 % железа и 25 % кремния. Соотношение между *Fe* и *Si* равно примерно 1:3, что, согласно ГОСТ 1415-93, соответствует ферросплаву марки ФС 65 [17], и поэтому ЗШО могут рассматриваться в качестве сырья для его производства.

В пирометаллургических процессах высокотемпературное восстановление металлов производится как неметаллическими (твердый углерод, оксид углерода, водород) восстановителями, так и металлическими (алюминий, магний, кальций и другие металлы), сродство которых к кислороду больше, чем у восстанавливаемого металла.

В зависимости от восстановителя процесс называют карботермией (восстановитель *C* и *CO*), металлотермией (алюмотермия, кальцийтермия, магнийтермия, силикотермия) и водородотермией.

Карботермия и водородотермия — наиболее распространенные технологии. Они являются основой получения черных металлов в доменных печах, в процессах получения железа прямого восстановления DRI (от англ. *Direct Reduced Iron*), а также в электротермии.

В цветной металлургии с помощью карботермии получают *Pb*, *Sn*, часть *Zn* и некоторые другие металлы.

Таблица 2
Содержание химических элементов в отвальных породах

Элемент	Содержание, мг/кг	Кларк
<i>Hg</i>	0,28–1,32	0,04
<i>Pb</i>	38,8–497,5	20
<i>Cu</i>	21,3–63,7	57
<i>As</i>	12,8–57,2	6,6
<i>V</i>	133–241,7	130
<i>Mn</i>	371– 87	650
<i>Cr</i>	112,1–159,2	100
<i>Mo</i>	2–4	2
<i>Li</i>	53,9–109,4	6
<i>Cd</i>	1,55–2,3	0,3
<i>Zn</i>	100–121,7	80
<i>C</i>	15–25 %	–

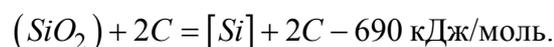
В целом до металлического состояния могут восстанавливаться только оксиды металлов, имеющих сродство к кислороду меньше, чем у восстановителя, т. е. прочность которых ниже прочности образующихся оксидов восстановителя.

При этом степень восстановления тех или иных оксидов и их распределение между жидкой, твердой и газообразной фазами определяются физико-химическими условиями конкретного процесса.

Как известно из теории и практики доменного процесса [18], помимо оксидов железа легко восстановимы высшие оксиды *Mn* (*MnO*₂ и *Mn*₂*O*₃), *Cu*₂*O* и *NiO*, прочность которых ниже соответствующих оксидов *Fe*. Они восстанавливаются газами (косвенным путем) при сравнительно невысоких температурах.

Оксиды, прочность которых выше оксидов *Fe* (*Cr*₂*O*₃, *MnO*, *SiO*₂, *TiO*₂), восстанавливаются при высоких температурах исключительно прямым путем (твердым углеродом). Восстановленные металлы, в зависимости от их растворимости в железе, переходят в чугун или шлак.

Восстановление кремния в доменной печи идет при температурах выше 1500 °С по реакции



Так как реакция эндотермическая, выплавка ферросилиция ведется с повышенным расходом кокса (1300–1400 кг/т сплава). При этом степень восстановления Si составляет 35–50 % (содержание в сплаве не более 12–15 % Si).

Для реализации доменного процесса необходима добыча коксующихся углей, производство кокса, обогащение и окускование сырья и т. д. Все это помимо производственных затрат оказывает неблагоприятное влияние на экологическую обстановку промышленно развитых регионов.

В DRI-процессах получения железа и стали непосредственно из рудных материалов (минуя стадию выплавки чугуна в доменных печах) металл восстанавливается газами (CO , H_2), твердым углеродом или газами и твердым углеродом совместно. Процесс ведется при температуре около 1000 °С, при которой примеси (Si , Mn , P , S), содержащиеся в пустой породе руды, не восстанавливаются [19].

Электротермическая рудовосстановительная плавка является основным металлургическим процессом производства различных ферросплавов, в том числе и ферросилиция (электропечным способом выплавляют около 96 % от общего объема производства ферросплавов).

Процесс заключается в восстановлении шихты (состоящей из кварца, коксика и металлической стружки) углеродом при высоких температурах, которые создаются главным образом за счет электрической дуги в рудотермических печах мощностью до 100 МВА [20, 21].

Процесс восстановления обычно непрерывный. По мере проплавления подготовленную шихту загружают в ванну, а полученные продукты периодически выпускают из электропечи.

Все проанализированные выше процессы связаны с затратами большого количества тепловой энергии, так как реакции углетермического восстановления металлов в основном эндотермические, а получаемый продукт науглероживается, что приводит к снижению его качества.

При металлотермическом восстановлении процесс идет с выделением тепла (экзотермический), и может быть получен низкоуглеродистый продукт.

Наиболее простым и доступным методом металлотермии является алюмотермия.

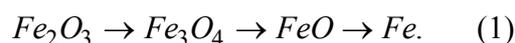
Важным этапом процесса является подготовка оксидов металлов, заключающаяся в их тщательном измельчении и смешивании с алюминиевым порошком.

Эффективность и качество процесса алюмотермии зависят от правильного подбора смеси оксидов восстанавливаемых металлов, алюмосодержащего сырья, температуры и времени проведения процесса.

При анализе процессов металлотермии обычно рассматривают восстановление одним каким-либо металлом. В случае же металлотермии оксидов ЗШО на протекание процесса и его тепловой режим будет оказывать влияние дополнительное восстановление твердым углеродом недожога.

Присутствующие в ЗШО оксиды железа, как известно, легко восстанавливаются газами CO и H_2 при умеренных температурах (до 1000 °С). Однако в системе «ЗШО — алюмосодержащий продукт» и до начала металлотермического восстановления, и в ходе его интенсивного развития газообразный восстановитель отсутствует. Поэтому восстановление железа в соответствии с основными положениями теории металлургических процессов может быть представлено следующим образом.

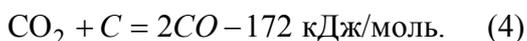
Согласно принципу последовательности превращений А. А. Байкова, восстановление железа проходит с понижением его валентности по кислороду (отношения количества атомов кислорода, приходящихся на один атом металла) по схеме



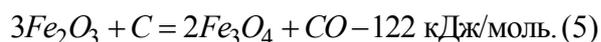
Высший оксид железа Fe_2O_3 непрочный и при нагревании подвергается термической диссоциации с переходом в Fe_3O_4 без участия восстановителя по реакции (2). Далее в результате протекания реакций (3)

МЕТАЛЛУРГИЯ

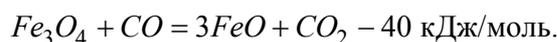
и (4) будет газифицирована часть углерода недожога:



Суммарная реакция (5) процессов первого этапа восстановления Fe имеет вид



На втором этапе Fe_3O_4 восстанавливается до FeO косвенным путем: вначале CO , образовавшимся на первом этапе, а затем газом газификации углерода недожога по реакции (4):



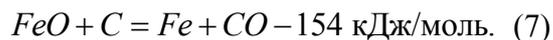
Итоговая реакция этапа имеет вид



По аналогии на третьем этапе FeO восстанавливается до металлического Fe по реакции



а итоговое уравнение реакции этого этапа имеет вид



В целом в результате суммирования реакций (5), (6) и (7) восстановление Fe ЗШО будет описываться уравнением реакции (8):



Уравнение (8) не отражает механизма процесса, а лишь показывает, что восстановление идет с расходом твердого углерода недожога с образованием CO и с поглощением большого количества тепла.

В соответствии с уравнением (8) в расчете на 100 кг ЗШО из содержащегося в них оксида Fe_2O_3 количество восстановленного углеродом недожога (C_o) железа будет равно

$$Fe = 0,7 \cdot Fe_2O_3 \text{ кг}.$$

При этом будет газифицировано

$$C_{Fe} = 0,225 \cdot Fe_2O_3 \text{ кг}$$

твердого углерода с образованием оксида углерода в количестве

$$CO_{Fe} = 0,525 \cdot Fe_2O_3 \text{ кг}$$

или

$$CO_{Fe} = 0,42 \cdot Fe_2O_3 \text{ м}^3.$$

Затраты тепла на восстановление Fe составят

$$Q_{Fe} = -3068,75 \cdot Fe_2O_3 \text{ кДж}.$$

На восстановление железа расходуется только часть углерода недожога.

Оставшийся углерод в количестве, равном

$$C_{Si} = C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3 \text{ кг},$$

расходуется на прямое восстановление кремния.

Возможное количество восстановленного углеродом кремния составит

$$Si_c = 1,17 \cdot (C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3) \text{ кг}.$$

На его восстановление будет израсходовано

$$SiO_{2c} = 2,5 \cdot (C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3),$$

а затраты тепла составят

$$Q_{Si} = -11500 \cdot SiO_{2c} \text{ кДж}.$$

В результате газификации твердого углерода выделится оксид углерода в количестве

$$CO_{Si} = 2,32 \cdot (C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3) \text{ кг}$$

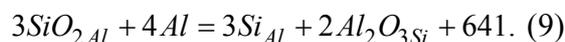
или

$$CO_{Si} = 1,86 \cdot (C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3) \text{ м}^3.$$

Оставшееся количество SiO_2 , равное

$$SiO_{2Al} = SiO_{2зшо} - SiO_{2c} \text{ кг},$$

должно быть восстановлено алюминием по реакции



МЕТАЛЛУРГИЯ

Тепловой эффект реакции (9) составляет +640 кДж/моль.

Расход Al на восстановление кремния равен

$$Al = 0,6 \cdot SiO_{2Al} \text{ кг.}$$

При этом образуется

$$Al_2O_3 = 1,133 \cdot SiO_{2Al} \text{ кг.}$$

Выход ферросилиция составит

$$\Phi C = 0,7 \cdot Fe_2O_3 + 0,47 \cdot SiO_2 \text{ кг,}$$

а шлака

$$U = 100 - Fe_2O_3 - SiO_2 + Al_2O_{3Al} \text{ кг.}$$

Содержание Al_2O_3 в шлаке будет составлять 75–90 %, что в 1,3–1,5 раза больше, чем в природных бокситах и глиноземе. Поэтому такой шлак будет ценным сырьем для производства алюминия.

В результате алюмотермии выделяется

$$Q_{Al} = +3561 \cdot SiO_{2Al} \text{ кДж}$$

тепла.

Согласно правилу С. Ф. Жемчужного [22], величина $\Delta H / (M_{Si} + M_{Al_2O_3})$ для реакции (9) равна 2465 Дж/г. Такое численное значение величины приемлемо для самопроизвольного управляемого процесса металлотермии, и выделяющегося тепла достаточно для расплавления продуктов реакции и их нагрева до температуры, при которой реализуется процесс восстановления. В целом для пирометаллургического процесса переработки ЗШО методом алюмотермии при условии сжигания выделившегося CO над слоем образовавшегося шлака и с учетом дополнительного тепла, необходимого на расплавление металла и шлака, обеспечение их высокой жидкоподвижности на выпуске, а также покрытие других неучтенных расходов тепла Q_{don} , уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$Q_{SiAl} + Q_{CO} = Q_{Fe} + Q_{SiC} + Q_{don}. \quad (10)$$

После подстановки в уравнение (10) выражений Q , приведенных выше, приняв,

что $Q_{don} = 15\%$ и произведя простейшие преобразования, получим следующее уравнение:

$$C_{зшо} = 0,103 \cdot SiO_2 - 0,05 \cdot Fe_2O_3 \text{ \%}.$$

Последнее уравнение позволяет установить предельное содержание недожога в ЗШО, при котором возможна пирометаллургическая переработка ЗШО алюмотермией.

Например, при среднем содержании в ЗШО $SiO_2 = 54\%$ и $Fe_2O_3 = 14\%$ недожог углерода может быть не более 4,8 %, что позволяет сделать заключение о необходимости удаления излишка углерода перед переработкой отхода.

При рассмотрении комплексной переработки ЗШО особое внимание уделяют возможности извлечения из них ценных, редких и редкоземельных металлов.

Наиболее распространенными методами переработки золошлаков являются магнитная сепарация, гидроциклонирование, обогащение на концентрационных столах и в концентраторах, с помощью которых может быть извлечено железо, золото, серебро и кремнезем, используемый в дальнейшем в строительной индустрии [12, 14]. Показатель извлечения редких и редкоземельных элементов с использованием указанных методов не превышает 12–15 % [15, 16].

В данном анализе этим направлениям переработки ЗШО внимания не уделено, но несомненно, что металлы и их оксиды, плавящиеся и испаряющиеся при низких температурах, в частности щелочные металлы (например, литий: $t_{пл} = 180,5\text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{кип} = 1342\text{ }^\circ\text{C}$ — самые высокие из всех щелочных металлов) при алюмотермии золошлаков будут переходить в газовую фазу, из которой они могут быть успешно извлечены.

Следует отметить, что проведенный анализ носит предварительный характер, хотя и показывает возможность переработки ЗШО методом металлотермического восстановления с получением ферросилиция.

В ходе дальнейшей работы в этом направлении необходимо проанализировать кине-

тические особенности процесса, определить степень завершения реакций как расчетным, так и опытным путем, провести теплотехнические расчеты, а также разработать технологию производственного процесса.

Выплавку ферросилиция целесообразно вести в закрытых электропечах с периодическим выпуском сплава и шлака и непрерывным удалением печных газов.

Кроме того, ЗШО могут быть использованы в технологиях дугового глубинного восстановления (ДГВ) полезных для черной металлургии элементов непосредственно в жидкий чугун и сталь [23]. Наличие в составе ЗШО большого количества оксидов кремния, алюминия и железа делает их достаточно ценным сырьем для утилизации по данному методу.

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенный анализ показывает, что переработка золошлаковых отходов тепловых электростанций методами пирометаллургии с использованием алюмотермического восстановления принципиально возможна. Наиболее перспективными являются выплавка ферросилиция и глиноземистого шлака, а также ДГВ полезных элементов непосредственно в железоуглеродистый расплав.

Такой подход будет способствовать не только энерго- и ресурсосбережению, но и

улучшению экологической обстановки промышленно развитых регионов.

Показано, что выделяемого при алюмотермии ЗШО тепла достаточно для протекания самопроизвольного управляемого процесса (расплавления продуктов реакции и их нагрева до температуры, при которой реализуется процесс восстановления).

Установлена зависимость, позволяющая установить предельное содержание недожога в ЗШО, при котором возможна их пирометаллургическая переработка алюмотермией, и предложены направления подготовки ЗШО к переделу.

Показано, что при алюмотермии кремния возможно восстановление РЗМ и ШЗМ, входящих в состав ЗШО. Часть этих элементов может переходить в ферросплав, сталь или чугун (в зависимости от схемы переработки ЗШО) и улучшать их свойства, а часть — в газовую фазу для последующего извлечения существующими стандартными способами.

После проведения дополнительных теоретических исследований планируются лабораторные эксперименты для разработки технологии производства ферросилиция алюмотермией кремния из ЗШО и опытно-промышленное её опробование в производственных условиях.

Список источников

1. *Statistical Review of World Energy 2023 / Energy Institute. 72nd edition. London : EI Statistical Review of World Energy, 2023. P. 52–53.*
2. *Belyakov N. Sustainable Power Generation: Current Status, Future Challenges, and Perspectives. London : Academic Press, 2019. 598 p. URL: <https://www.overdrive.com/media/4616508/sustainable-power-generation> (date of treatment: 01.03.2025).*
3. *ГОСТ 32347-2013. Угли каменные и антрациты Кузнецкого и Горловского бассейнов для энергетических целей. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2013. 12 с.*
4. *Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / под ред. Д. О. Скобелев ; ФГАУ «НИИ „ЦЭПП“». М. ; СПб. : Реноме, 2019. 824 с.*
5. *Путилин Е. И., Цветков В. С. Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. М. : СоюздорНИИ, 2003. 60 с.*
6. *Комплексное использование золошлаковых отходов / О. В. Афанасьева, Г. Р. Мингалеева, А. Д. Добронравов, Э. В. Шамсутдинов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 26–36. EDN УУСРТJ*

7. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Ч. 1 / Г. С. Подгородецкий [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 6. С. 439–446. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-439-446. EDN XSKGNF
8. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / Z. T. Yao [et al.] // Earth-Science Reviews. 2015. Vol. 141. P. 105–121. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016. EDN UOMXTL
9. Blissett R. S., Rowson N. A. A review of the multicomponent utilisation of coal fly ash // Fuel. 2012. Vol. 97. P. 1–23. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.03.024. EDN PGGOXF
10. Sett R. Flyash: characteristics, problems and possible utilization // Advances in Applied Science Research. 2017. Vol. 8 (3). P. 32–50.
11. Адеева Л. Н., Борбат В. Ф. Зола ТЭЦ — перспективное сырье для промышленности // Вестник Омского университета. 2009. № 2. С. 141–151. EDN KYSMSR
12. Анализ возможности использования золошлаковых отходов ТЭС ДНР в строительстве / С. Е. Гулько [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. 2023. Вып. 5 (163). С. 103–112. EDN PEAXSL
13. The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material / O. M. Sharonova, V. V. Yumashev, L. A. Solovyov, A. G. Anshits // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 91. No. 7. P. 60–72. DOI: 10.18720/MCE.91.6. EDN BWNRWJ
14. Худякова Л. И., Залуцкий В. А., Палеев П. Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций // XXI век. Техносферная безопасность. 2019. Т. 4. № 3 (15). С. 375–391.
15. Власова В. В., Артемова О. С., Фомина Е. Ю. Определение направлений эффективного использования отходов ТЭС // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 11. С. 36–41. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-36-41. EDN ZQUBCF
16. Закономерности формирования и перспективы комплексного использования металлоносных углей восточного Донбасса / М. И. Гамов [и др.] // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 8. С. 1477–1487. DOI: 10.15372/GiG20160804. EDN WHAIFR
17. ГОСТ 1415-93 Ферросилиций. Технические требования и условия поставки. М. : Стандартинформ, 2005. 14 с.
18. Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В. Е. Металлургия чугуна. К. : Вища школа, 1988. 212 с.
19. Товаровский И. Г., Лялюк В. П. Эволюция доменной плавки : монография. Днепрпетровск : Пороги, 2001. 424 с.
20. Рысс М. А. Производство ферросплавов. М. : Металлургия, 1985. 344 с.
21. Лякишев Н. П., Гасик, В. Я., Дашевский М. И. Металлургия ферросплавов. Ч. 1. Металлургия сплавов кремния, марганца и хрома : учеб. пособие. М. : МИСиС, 2006. 117 с.
22. Теория металлургических процессов : учебник для вузов / Д. Н. Рыжонков [и др.]. М. : Металлургия, 1989. 392 с.
23. Куберский С. В. Технологические особенности дугового глубинного восстановления полезных примесей металлургических отходов для обработки железоуглеродистых расплавов // Металлург. 2024. № 4. С. 100–105. DOI: 10.52351/00260827_2024_4_100. EDN LMZPLL

© Русанов И. Ф., Куберский С. В., Проценко М. Ю., Кононенко Г. И.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Должиковым В. В.,
начальником патентного отдела ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 03.03.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Русанов Игорь Фаустович, канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Куберский Сергей Владимирович, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Проценко Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Кононенко Геннадий Иосифович, аспирант каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Rusanov I. F., *Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu., Kononenko G. I. (*Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: Skuberskiy@yandex.ru*)

THEORETICAL ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF PROCESSING THE THERMAL POWER PLANTS ASHES BY PYROMETALLURGY METHODS

The work of TPPs in Russia and the People's Republics of Donbass was analyzed. The composition of ash from TPPs of Donbass, existing directions of their processing are given. It is proposed to use the method of metal-thermal reduction for extraction of useful components from ash.

Key words: thermal power plant ash, ash composition, ash utilization, metallothermic reduction, ferrosilicon.

References

1. *Statistical Review of World Energy 2023*. Energy Institute. 72nd edition. London : EI Statistical Review of World Energy, 2023. P. 52–53.
2. Belyakov N. *Sustainable Power Generation: Current Status, Future Challenges, and Perspectives*. London : Academic Press, 2019. 598 p. URL: <https://www.overdrive.com/media/4616508/sustainable-power-generation> (date of treatment: 01.03.2025).
3. GOST 32347-2013. *Stone coals and anthracites of Kuznetsk and Gorlovsky basins for energy purposes. Technical conditions*. M. : Standardinform, 2013. 12 p.
4. *Encyclopedia of technologies. Evolution and comparative analysis of resource efficiency of industrial technologies [Ed-in-Ch. Skobelev D. O.] [Enciklopediya tekhnologij. Evolyuciya i sravnitel'nyj analiz resursnoj effektivnosti promyshlennykh tekhnologij]*. FSAI "SRI 'CEIP'". M. ; St. Petersburg : Renome, 2019. 824 p. (rus)
5. Putilin E. I., Tsvetkov V. S. *Review information of domestic and foreign experience of solid fuel combustion waste application at TPP. [Obzornaya informaciya otechestvennogo i zarubezhnogo opyta primeneniya othodov ot szhiganiya tverdogo topliva na TES]*. M. : SoyuzdorNII, 2003. 60 p. (rus)
6. Afanasieva O. V., Mingaleeva G. R., Dobronravov A. D., Shamsutdinov E. V. *Integrated utilization of ash and slag waste [Kompleksnoe ispol'zovanie zoloshlakovykh othodov]*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki*. 2015. No. 7–8. Pp. 26–36. (rus) EDN UYCPTJ
7. Podgorodetskiy G. S. [et al.]. *Problems and prospects of utilization of ash and slag wastes from TPPs. Ch. 1 [Problemy i perspektivy utilizacii zoloshlakovykh othodov TEC. Ch. 1]*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya*. 2018. Vol. 61. No. 6. Pp. 439–446. (rus) DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-439-446. EDN XSKGNF
8. Yao Z. T. [et al.]. *A comprehensive review on the applications of coal fly ash*. *Earth-Science Reviews*. 2015. Vol. 141. P. 105–121. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016. EDN UOMXTL
9. Blissett R. S., Rowson N. A. *A review of the multicomponent utilization of coal fly ash*. *Fuel*. 2012. Vol. 97. P. 1–23. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.03.024. EDN PGGOXF
10. Sett R. *Flyash: characteristics, problems and possible utilization*. *Advances in Applied Science Research*. 2017. Vol. 8 (3). P. 32–50.
11. Adeeva L. N., Borbat V. F. *TPP ash is a promising raw material for industry [Zola TEC — perspektivnoe syr'e dlya promyshlennosti]*. *Herald of Omsk University*. 2009. No. 2. Pp. 141–151. (rus) EDN KYMSMR

12. Gulko S. E. [et al.]. Analysis of the possibility of using ash and slag wastes from TPPs of DPR in construction [Analiz vozmozhnosti ispol'zovaniya zoloshlakovyh othodov TES DNR v stroitel'stve]. Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2023. Iss. 5 (163). Pp. 103–112. (rus) EDN PEAXSL

13. Sharonova O. M., Yumashev V. V., Solovyov L. A., Anshits A. G. The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material. Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 91. No. 7. Pp. 60–72. (rus) DOI: 10.18720/MCE.91.6. EDN BWNRWJ

14. Khudyakova L. I., Zalutsky V. A., Paleev P. L. Utilization of ash and slag wastes from thermal power plants [Ispol'zovanie zoloshlakovyh othodov teplykh elektrostancij]. XXI century. Technosphere safety. 2019. Vol. 4. No. 3 (15). Pp. 375–391. (rus)

15. Vlasova V. V., Artemova O. S., Fomina E. Yu. Determination of directions for the effective utilization of TPP waste [Opredelenie napravlenij effektivnogo ispol'zovaniya othodov TES]. Ecology and Industry of Russia. 2017. Vol. 21. No. 11. Pp. 36–41. (rus) DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-36-41. EDN ZQUBCF

16. Gamov M. I. [et al.]. Regularities of formation and prospects for complex utilization the metal-bearing coals of eastern Donbass [Zakonomernosti formirovaniya i perspektivy kompleksnogo ispol'zovaniya metallonosnykh uglej vostochnogo Donbassa]. Geology and Geophysics. 2016. Vol. 57. No. 8. Pp. 1477–1487. (rus) DOI: 10.15372/GiG20160804. EDN WHAIFR

17. GOST 1415-93. Ferrosilicon. Technical requirements and delivery conditions. M. : Standardinform, 2005. 14 p.

18. Efimenko G. G., Gimmelfarb A. A., Levchenko V. E. Iron Metallurgy [Metallurgiya chuguna]. K. : Vishcha shkola, 1988. 212 p. (rus)

19. Tovarovsky I. G., Lyalyuk V. P. Evolution of blast-furnace smelting : a monograph [Evolyuciya domennoj plavki : monografiya]. Dnepropetrovsk : Porogi, 2001. 424 p. (rus)

20. Ryss M. A. Ferroalloys production [Proizvodstvo ferrosplavov]. M. : Metalurgija, 1985. 344 p. (rus)

21. Lyakishev N. P., Gasik V. Ya., Dashevskiy M. I. Metallurgy of ferroalloys. Ch. 1. Metallurgy of silicon, manganese and chromium alloys : textbook [Metallurgiya ferrosplavov. Ch. 1. Metallurgiya splavov kremniya, marganca i hroma : ucheb. posobie]. M. : MISIS, 2006. 117 p. (rus)

22. Ryzhonkov D. N. [et al.]. Theory of metallurgical processes : textbook for universities [Teoriya metallurgicheskikh processov : uchebnik dlya vuzov]. M. : Metalurgija, 1989. 392 p. (rus)

23. Kuberskii S. V. Technological features of arc deep recovery of useful impurities of metallurgical wastes for the treatment of iron-carbon melts [Tekhnologicheskie osobennosti dugovogo glubinnogo vosstanovleniya poleznykh primesej metallurgicheskikh othodov dlya obrabotki zhelezouglerodistykh rasplavov]. Metallurg. 2024. No. 4. Pp. 100–105. (rus) DOI: 10.52351/00260827_2024_4_100. EDN LMZPLL

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rusanov Igor Faustovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies

Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia

Kuberskii Sergey Vladimirovich, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies

Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Protsenko Mikhail Yuriyevich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies

Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia

Kononenko Gennady Iosifovich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Technologies

Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia