УДК 622.7

Л.В. СКЛЯР, **канд. техн. наук**
(Украина, Кривой Рог, Государственное ВУЗ "Криворожский национальный университет")

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВ ЗЕЛЕНОДОЛЬСКОЙ ТЭС С ПОЛУЧЕНИЕМ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ МИКРОСФЕР

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Переработка твердого топлива связана со значительным выходом минеральных отходов. На сегодняшний день в отвалах четырнадцати ТЭС Украины аккумулировано 358,8 млн т золошлаков на площади 3170 га. Среднегодовой выход шлаков достигает 14 млн т и в связи с ухудшением качества топлива имеет тенденцию к росту. Отвалы занимают значительные земельные площади и являются источниками неблагоприятной экологической обстановки в регионах. Ежегодно увеличивается стоимость транспортировки золы и шлаков ТЭС в отвалы, стоимость строительства золоотвалов и их реконструкции.

Длительное время считалось, что минеральные компоненты твердого топлива являются балластом при его переработке, поэтому отходы направлялись в отвалы, что влекло за собой рост объемов золоотвалов, сооружение которых связано с отчуждением пахотной земли, требует больших капитальных затрат и нарушает экологический природный баланс.

Зола большинства видов топлива на 98-99% состоит из свободных и связанных в химические соединения оксидов кремния, железа, алюминия, кальция, магния, калия, натрия, титана, серы. Из микрокомпонентов в золе содержатся: бор, молибден, германий, галлий, уран, мышьяк, ванадий, ртуть, цинк, свинец, никель, кобальт, фтор и другие. Химический состав золы может колебаться при сжигании одного и того же топлива на ТЭС, однако в среднем химический состав в течение длительного периода можно считать достаточно стабильным для практического применения. Учитывая вещественный состав и физико-механические характеристики минеральных частей сгоревшего топлива, отходы ТЭС можно рассматривать как сложное техногенное сырье, пригодное для переработки известными методами.

Анализ исследований и публикаций. Уровень переработки и использования золошлаковых отходов (ЗШО) за последние 10 лет колебался от 3 к 13% их годового выхода. При этом используются традиционные технологии (обвалование дамб, планировка территории, производство мелкоштучних строительных изделий и так далее). Часть использования ЗШО в США составляет 22%, в Китае – 25%, в странах ЕС – 90%.

В Германии функционирует наибольшая на Европейском континенте фирма по использованию зол ТЭС – Bau Mineral (BM) – дочерняя фирма энергосистемы. Эта компания – связующее звено между ТЭС и строительной индустрией.

ВМ города Хертен была образована в 1989 г. путем слияния двух компаний, которые до 1989 г. уже обладали 30-летним опытом в использовании побочных продуктов электростанций. ВМ – гарантирует приобретение побочных продуктов ТЭС с помощью операторов самих ТЭС.

Продукция ВМ отвечает стандартам и инструкциям DIN, которые подвержены внешнему контролю со стороны институтов тестирования стройматериалов. Основа гарантии качества – непрерывный контроль продукции в собственных прекрасно оборудованных лабораториях тестирования стройматериалов.

В Германии создан и действует Технический Союз потребителей побочного продукта ТЭС (ТСППТЭС).

По данным ТСППТЭС в 2001 году в Германии произведено 25 млн. т побочного продукта ТЭС: 15 млн. т – на ТЭС, работающих на буром угле; 10 млн. т – на ТЭС, работающих на каменном угле.

ТЭС на буром угле выработали: 7,9 млн т – летучей золы,1,8 млн т – топочного песка, 5,3 млн. т – гипса и других продуктов.

ТЭС на каменном угле выработали: 4,3 млн т – летучей золы, 0,53 млн т – топочного песка, 0,20 млн т – гипса, 4,97 млн т – граншлаков.

Области использования: добавки в бетон, раствор, цемент, силикатные изделия, производство кирпича, подземное и дорожное строительство.

В Германии 3,1 млн т цемента заменяется золой. Зола утилизировалась экологически чистым методом. Экономятся ресурсы, энергия, необходимая для производства цемента; сокращены выбросы CO_2 на 3,1 млн т (при производстве 1 т цемента происходят выбросы 1 т CO_2), что существенно в свете требований Киотского протокола по снижению выбросов CO_2. Окупаются расходы на силосы, транспорт, заработную плату.

Электростанция (ТЭС) – производитель продуктов, а не отходов. В Китае золошлаки ТЭС отпускаются потребителям бесплатно.

В Польше применяются мощные экономические рычаги, стимулирующие использования золошлаков.

Зола и шлак образуются в результате термохимических превращений неорганической части топлива (мазут, газ, уголь, сланец) и различаются по химико-минералогическому составу, физико-механическим свойствам в зависимости от вида топлива и его происхождения [1-4].

Известен способ выделения высококачественного магнетита из летучей золы, образующейся при сжигании угля на ТЭС. Способ предусматривает применение сухой и мокрой магнитной сепарации, извлечения с получением магнетита удельной плотностью 4,1-4,5 г/см^3, который используется при тяжелосредном обогащении.

Предыдущие исследования, поведенные в Приднепровской лаборатории "УкрНИИуглеобогащение", Донецким политехническим и Днеприм горными институтами показали, что золу можно успешно обогащать методом флотации.[5].

Для комплексной переработки зол тепловых электростанций, которые

сжигают малореакционные угли (Луганской, Приднепровской, Трипольской ТЭС), П.А. Егоровым была предложена следующая последовательность операций:

1. Регулирование содержания твердой фазы в пульпе, поступающей на переработку;
2. Классификация по крупности частиц пульпы;
3. Флотация пульпы золы класса +40 мкм;
4. Обезвоживания продуктов переработки;
5. Сушка и брикетирование угольного концентрат [6].

Разработан способ получения сульфата алюминия, в основе которого лежат два процесса: сернокислое выщелачивание алюминия из шлаков и кристаллизация алюминия.

В Казахстане разработан комплекс по переработке ЗШО, в котором цеха работают независимо друг от друга. Первый цех методом флотации выделяет недожиг, который высушивается и может применяться как вторичное топливо на угольных ТЕС. Второй цех получает алюмосиликатные микросферы разной фракции идеальной сферической формы, диаметром от 10-20 до 500 микрон.

Этот материал обладает рядом уникальных свойств и пользуется все большим спросом. В третьем цеху методом магнитной сепарации их ЗШО получают магнитную фракцию для производства ферросилиция, чугуна и стали, а также порошковой металлургии. В четвертом цеху ЗШО сплавляют с содой и при водном выщелачивании плава переводят в раствор до 70% кремнезема. Охлажденный спек смешивают с раствором соляной кислоты. Обезкремненый раствор поступает на передел редкоземельных элесентов, а кек на производство соединения кремния. 90% выпускаемой продукции готовы закупать зарубежные компании.

Исходя из научно-исследовательских разработок и практического опыта по утилизации золошлаковых отходов возможно выделить такие методы обогащения шлаков ТЭС: сухая и мокрая магнитная сепарация; флотация; химическое обогащение.

Постановка задачи. Целью данной работы было разработка комплексной технологии переработки золошлаков Зеленодольской ТЭС с получением железо-, угле- и алюмосодержащих продуктов.

Изложение материала и результаты. При изучении вещественного состава золошлакового материала применялись гранулометрический, химический, спектральный, оптический, термический, гравитационный и другие анализы.

В ходе изучения золошлакового материала установлено, что эти продукты представляют собой рыхлую массу с зернами различных размеров, реже плотные оплавившиеся и лишь частично спекшиеся пористые куски шлака.

В их составе можно выделить три группы веществ: кристаллические, стекловидные и органические.

Кристаллическое вещество представлено первичными минералами вещества топлива (магнетит, гематит, кварц) и новообразованиями, полученными в топочном процессе (силикаты, алюминаты).

В топочных процессах происходит ряд превращений, которые не успевают завершиться до наступления равновесного состояния. Продуктом такого незавершенного равновесия является стекловидная фаза. Разнообразие стекловидных фаз сводится к четырем видам, отличающиеся цветом и показателем преломления: А – бесцветная, В – желтая, С – бурая, Д – черная. Зола одной ТЭС содержит несколько стекловидных составляющих с преобладанием, одной из них. В этих продуктах содержится обычно некоторое количество частичек несгоревшего топлива (от единичных продуктов по 30-40%). При удовлетворительном течении процесса сгорания и высокой реакционной особенности топлива их количество невелико. Несгоревшее топливо отличается от исходного и присутствует в виде кокса и полукокса с малой гигроскопичностью. Перечисленные выше фазово-минералогические составляющие являются основными для золы топлив.

Результаты химического анализа шлаков приведен в таблице 1.

Таблица 1

Результаты химического анализа шлаков, %

Fe	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 +FeO	MnO	MgO	CaO	P_2O_5	SO_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	п.п.п.
8,3	51,2	18,0	14,4	0,07	1,3	1,6	0,082	0,12	3,0	0,9	0,82	7,5

Как видно из данных, приведенных в таблице 1, основной интерес представляет выделение алюмосиликатных микросфер, кремнезема (SiO_2), глинозема (Al_2O_3).

Результаты гранулометрического анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2

Гранулометрическая характеристика шлаков, %

Класс крупности, мм	Выход	V	Ti	Zr
+0,5	6,0	0,03	0,1	0,01
0,5-0,25	5,3	0,03	0,1	0,01
0,25-0,16	9,5	0,03	0,1	0,01
0,16-0,07	33,1	0,04	0,1	0,01
0,07-0,04	13,0	0,03	0,1	0,01
-0,04	33,1	0,04	0,1	0,01
Итого	100,0	0,03	0,1	0,01

Данные таблицы показывают, что проба шлаков в основном представлена классом -0,16+0 мм, выход которого составил 79,2%. В золошлаках наиболее ценным являются ванадий, содержание которого составляет 0,03-0,04%. Итрий, никель, германий, хром и титан рассматриваются, как попутные продукты.

Термический анализ показал, что шлаки крупностью -0,5+0 мм представлены в основном углем, магнетитом и фаялитом. В пробе есть кристобалиты, сфен (титанит). Кроме того, в пробе присутствуют минералы не дающие энергоэффектов), это может быть полевой шпат типа ортоклаза и фосфаты.

Для оптического анализа золошлакового материала характеризующегося

большой неоднородностью вещественного состава, необходимо предварительное выделение однородных фаз в отдельные фракции, что обеспечит более полную диагностику состава. Исследуемый золошлаковый материал после разделения по классам крупности направлялся на фракционный анализ. Результаты фракционного анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты фракционного анализа шлаков, %

Класс крупности, мм	Плотность разделения т/м^3	Фазово-минералогический состав, %									
		Выход, %	Минералы железа	Фосфаты, карбонаты	Шарики			Стекло	Округлые гранулы	Кварц	Уголь
					черные	бесцветные	белые, матовые				
+1,0	>4,2	0,4	50	–	45	5	–	–	–	–	–
-1,0+0,5	2,8-4,2	1,4	20	–	65	15	–	–	–	–	–
-0,5+0,25	>2,6	1,9	–	2	1	2	–	79	–	16	–
	<2,6	20,1	–	–	8	14	5	64	–	8	1
-0,25+0,16	>2,6	0,3	–	10	25	10	5	15	–	35	–
	<2,6	26,1	–	5	10	10	5	10	7	8	45
-0,16+0,07	>2,6	0,3	–	13	70	12	–	–	–	5	–
	<2,6	22,8	–	5	15	35	5	5	10	12	13
-0,07+0,04	>2,6	1,3	–	22	60	15	3	–	–	–	–
	<2,6	25,4	–	2	17	28	8	–	20	–	25
		100	0,4	3,3	14,1	21,0	5,4	18,4	9,2	6,8	21,3

Из таблицы 3 видно, что все классы крупности представлены одним фазово-минералогическим составом, но относительное содержание их в разных классах существенно отличается. Исключение составляет класс крупности минус 0,5 мм, в котором отсутствуют частицы несгоревшего угля. Этот класс состоит из стекловидных обломков темно-бурого и желтого цвета, небольшого количества черных шаров и обожженного глинистого вещества. Обломки темного стекла неправильной угловатой формы, иногда в виде столбиков и пластинок. Цвет стекла меняется от бурого, почти черного до зеленовато-коричневого.

Тяжелая фракция (>2800 кг/м^3) из-за малого выхода выделялась из объединенной пробы всех классов крупности. В основном она состоит из черных магнитных шариков и хромита. У одних шариков гладкая блестящая поверхность, у других шероховатая матовая. На поверхности 10% шариков наблюдаются корочки гематита. Гематит встречается и отдельными зернами. Небольшое количество бесцветных шариков содержит вкрапленность магнита. Хромит присутствует в виде черных блестящих октаэдров размером 0,2-0,1 мм. Магнетит встречается, как в виде самостоятельных оплавленных шариков и не оплавленных частиц, так и в виде тонкой вкрапленности в другие минералы и фазы. В небольшом количестве в этой фракции отмечаются фаялит, титанит, в единичных знаках силлиманит, лейкокосен-ильменит, гидрооксиды железа.

Средняя фракция (2600-2800 кг/м^3) состоит из обломков стекла темно-бурого и желтого цвета, зерен кварца и шариков различного цвета. Черные шарики как магнитные, так и немагнитные. Кварц представлен зернами неправильной формы, имеющими стеклянный блеск. Следует отметить, что средняя фракция класса крупности -0,5+0,25 мм состоит в основном из обломков стекла, в остальных классах крупности преобладают шарики разного цвета, также как и в тяжелой фракции. Кроме того в небольших количествах встречаются ангидриды, кальциты. Все фазы загрязнены вкрапленностью магнетита и угля.

Большую часть легкой (<2600 кг/м^3) фракции составляют частицы несгоревшего угля и шарики различного цвета, кусочки несгоревшего угля претерпели изменения разной степени: от плотных, матовых, твердых до блестящих, округлых и мягких, разрушающихся при легком надавливании. Больше всего несгоревшего угля находится в классе крупности -0,25+0,16 мм. Шарики черные, бесцветные и слегка окрашенные, прозрачные и непрозрачные, полные и заполоненные. Они сходны с шариками других фракций. Наблюдаются также окатанные гранулы неправильной формы, непрозрачные, матовые, светло-серого цвета. Эти зерна часто содержат включения магнетита и угля. Тридимит представлен в виде бесцветных или дымчатых обломков, имеющих стеклянный блеск. Встречаются зерна гипса и полевого шпата.

Стекловидные шарики и обломки, входящие в состав всех фракций, имеют различные показатели преломления, а, следовательно, и состав. согласно показателям преломления, стекловидная фаза состоит из стекол полевошпатового, кварцевого и железистого составов, железистого кордиерита и кристобалита. Стекла имеют близкие физико-механические свойства: плотность – 2550-2650 кг/м^3, твердость – 5-7,5, удельная магнитная восприимчивость – $(0,46\text{-}0,92)\cdot 10^{-6}$ см^3/г.

В результате изучения вещественного состава золошлакового материала установлено, что разделения шлаков на мономинеральные фракции достичь невозможно. Это объясняется спецификой шлакового материала, химической неоднородностью компонентов, их взаимным приплавлением, наличием пузырьков газа внутри шариков стекла, вкрапленностью магнетита и угля в другие фазы и минералы.

На основании выполненных поисковых исследований по магнитному обогащению и флотации была разработана комплексная технология обогащения с получением железо-, угле- и алюмосодержащих продуктов. Исходный шлак (-10+0 мм) подвергается защитному грохочению на вибрационном грохоте во избежание попадания посторонних предметов в процесс. Шлаковая фракция отходов, крупностью -10+2,5 мм выводится из схемы грохочением. При дальнейшей классификации подрешетного продукта в гидроциклонах угольные зерна и бесцветные микросферы, плотностью менее 1000 кг/м^3 уходят в сливной продукт гидроциклона, а из песков гидроциклона грохочением получена шлаковая фракция – 2,5-1,0 мм, которая может быть использована, как абразивный порошок для обработки металлических поверхностей струйными аппара-

тами. Магнитное обогащение подрешетного продукта позволяет получить железосодержащий продукт с массовой долей железа 35-42%. Немагнитные продукты представлены на 60-65% микросферами, в основном черного и черно-белого цвета, 28-30% силикатным стеклом и 4-6 % угольными зернами. На основании исследований сгущения продуктов переработки отходов, выполненных с целью максимального извлечения микросфер бесцветных и белого цвета в товарный продукт, рекомендуется два приема сгущения. В первом приеме сгущения в слив извлекаются микросферы плотностью менее 1000 кг/м^3, тонкие частицы угля и алюмосиликатного продукта. Во втором приеме сгущения тонкие частицы угля и алюмосиликатного продукта выделяются с продуктами сгущения, а в слив извлекаются микросферы, плотностью более 1000 кг/м^3. Для получения угольного концентрата с массовой долей золы не более 15 % была разработана и испытана схема обогащения флотации немагнитного продукта отходов. В отличие от общепринятых реагентных режимов флотации угольных шламов с применением керосина в качестве собирателя применен УР-410, который серийно производится из отходов коксохимического производства и пенообразователя при лучших технологических показателях. Зольность полученных угольных концентратов составила 10-15%, извлечение углерода в концентрат флотации порядка 95%, массовая доля углерода в хвостах – до 2%.

Алюмосиликатные микросферы представляют собой полые твердые частицы малого размера. При сгорании частиц угля примеси оксида алюминия, кремния и других элементов, присутствующих в природном угле, при высокой температуре образуют сложные силикаты, что принимают в расплавленном состоянии сферическую форму за счет растворенных в силикатах газов. Диаметр микросферы варьируется от 5 до 500 мкм.

Газовая фаза, законсервированная внутри микросфер, состоит в основном из азота, кислорода и оксида углерода. Характеристики алюмосиликатных микросфер приведены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристики алюмосиликатных микросфер

Физические							
Размер	Истинная плотность	Насипная плотность	Удель-ный вес	Твердость за Маосом	Температура плавления		Влажность
5-500 мкн	0,6-0,8 г/см^3	0,35-0,45 г/см^3	0,45-0,75	5-6	1300°С		0,3 % max
Химические							
SiO_2	Ai_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2
55-65%	20-28%	1-6%	0,2-0,6%	1-2%	0,2-4%	0,3-2 %	0,5-1%

Встречаются микросферы черные и молочно-белые, бесцветные и слегка окрашенные, прозрачные и непрозрачные, монолитные, полые и частично заполненные. Темноцветные микросферы, в основном, магнетитового состава, цветные и светло-крашеные различного алюмосиликатного состава.

Свойства алюмосиликатных микросфер:

– **Низкая плотность**. Насыпная плотность – 0,35-0,45 г/см$^{3.}$ Плотность материала стенок частиц – 2,5 г/см^3. Толщина оболочки сферы – 10% от диаметра. Состав газовой фазы внутри сфер: CO_2 – 70%, N_2 – 30%.

– **Высокая текучесть**. Благодаря форме частиц, микросферы как сыпучий материал обладают повышенной текучестью, что обеспечивает хорошее заполнение форм.

– **Компактная укладка частиц**. Сферы обеспечивают минимальное отношение площади поверхности к занимаемому объему и наиболее компактное заключения. Коэффициент укладки – 60-80% от теоретической. Форма частиц микросфер как наполнителя позволяет изменять вязкость полимерных материалов и резин.

– **Низкая усадка**. Микросферы – один из прозрачных наполнителей, который может обеспечивать низкую усадку.

– **Низкая теплопроводность**. Теплопроводность микросфер составляет 0,08 Вт/м•К, при t=20 °С.

– **Прочность**. Микросферы от трех до десяти раз прочнее, чем большинство полых стеклянных сфер. В отличие от стеклянных сфер, микросферы имеют высший предел прочности при сжатии благодаря прочной оболочке. Предел прочности на сжатие – 150-280 кг/см^2. Твердость по шкале Маоса – 5-6.

– **Инертность.** Благодаря химическому составу микросферы могут использоваться в растворителях, органических растворах, воде, кислотах или щелочах без потери свойств.

– **Термостойкость**. Микросферы не теряют свойств при температурах, превышающих 980°С.

– **Стоимость**. Микросферы на 50-200% дешевле, чем полые стеклянные сферы. В сравнении с менее дорогими наполнителями, микросферы в финансовом отношении эффективнее за счет экономии при погрузочно-разгрузочных

работах и сокращении веса.

Преимущества использования микросфер:

Сферическая форма означает, что для увлажнения поверхности наполнителя потребуется меньше смол, крепежного, воды и так далее, чем для любого другого формового наполнителя. Это приводит к снижению расхода смол или крепежного, что в свою очередь дает возможность использовать смеси с высоким содержанием твердой составляющей, а также снизить усадочную деформацию и часто сократить расходы. Сферические наполнители легко разбрызгивать, нагнетать насосом, наносить шпателем и так далее При высокой концентрации сферы уплотнены, но дальнейшего уплотнения не происходит. Таким образом, использование сфер способствует сохранению объема исходной продукции и, следовательно, они являются отличными наполнителями для мастик для герметизации трещин и швов.

Легкость. Преимущества низкой плотности очевидны: при 0,7 г/смз плотность микросферы составляет примерно 25 % плотности других минеральных наполнителей, однако сохраняют достаточную прочность, чтобы выдержать необходимые процессы смешивания, присадки и обработки. Алюмосиликатные микросферы обладают очень низкой **реакционной способностью**. Их химический состав обеспечивает высокую устойчивость к кислотам и щелочам. Они pH-нейтральны и не влияют на химический состав или реакции материалов или изделий, в которых они используются. **Изолирующие свойства.** Микросферы имеет низкую теплопроводность порядка 0,1 Вт/м•С°. В связи с этим, они широко используются как изоляционный материал для огнеупорной керамики, нефтепроводов, геотермических цементов, отделочного и штукатурного гипса для изоляции внешних стен зданий и во многих других случаях, когда требуется хорошая термоизоляция. **Высокая температура плавления.** Микросферы имеют высокую температуру плавления порядка 1200-1600°С, что значительно выше, чем температура плавления микросфер из синтетического стекла. Поэтому они широко используются для производства высокотемпературной изолирующей огнеупорной керамики, а также огнеупорных покрытий. **Твердость.** Твердая поверхность микросфер обеспечивает их высокую устойчивость к эрозии. Стекловидная оболочка микросферы полностью непроницаема для жидкостей и газов. Микросфера используется для создания **теплоизоляционной керамики**. Такая керамика обладает повышенной прочностью, малой объемной массой, низким коэффициентом теплопроводности. Совокупность уникальных свойств микросфер обусловливают широчайший спектр применений микросфер в современной промышленности.

Микросферы – уникальный материал, который вот уже более 30 лет используется в самых разных отраслях промышленности.

Нефтяная промышленность: материалы для нефтяных скважин, буровые растворы, дробильные материалы, взрывчатые вещества.

Строительство: сверх легкие бетоны, известковые растворы, жидкие растворы, цементы, штукатурка, покрытия, кровельные и звукозащитные материа-

лы, краска, защитные покрытия, декоративные материалы.

Керамика: огнеупорные материалы, огнеупорные кирпичи, покрытия, изоляционные материалы.

Пластины: нейлоновые, полиэтиленовые, полипропиленовые и материалы различной плотности.

Автомобилестроение: композиты, шины, комплектующие, звукозащитные материалы, грунтовка.

Выводы и направление дальнейших исследований. На основании выполненных поисковых исследований по магнитному обогащению и флотации предлагается комплексная технология обогащения с получением железо-, угле- и алюмосодержащих продуктов. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭС позволит решить задачи защиты окружающей среды, получения новых источников дефицитного минерального сырья и материалов, создания новых рабочих мест. Золошлаковые отходы, как товарный продукт сам по себе ничего не стоят, поскольку расходы на их изготовление, транспортировку и хранение на золоотвалах входят в себестоимость электроэнергии ТЭС и уже оплачены ее потребителями. Вовлечение в обогащение золошлаков позволит получить уникальное алюмосиликатное сырье – микросферы, которые обладают рядом уникальных свойств и имеют широкий спектр потребления. Материалы исследований будут использованы при разработке технологического задания на проектирование обогатительного комплекса.

Список литературы

1. Пантелеев В.Г., Ларина Э.А., Мелентьев В.А. Состав и свойства золы и шлака ТЭС: справочное пособие / Под. ред. М.А. Мелентьева. – Л: Энергоатомиздат, Ленинград отд-ние, 1985 – 288 с.

2. Вдовенко М.И. Минеральная часть энергетических углей (физико-химическое исследование) – Алма-Ата: Наука, 1973 – 256 с.

3. Пантелеев В.Г., Мелентьев В.А., Добкин Э.Л. Золошлаковые материалы и золоотвалы / Под ред. В.А. Мелентьев. – М.: Энергия, 1978 – 295 с.

4. Гофтман М.В. Прикладная химия твердого топлива – М: Металлурги-издат, 1963 – 597 с.

5. Вплив аполярних реагентів на флотацію зол теплових електростанцій / І.І. Мнушкін, М.Л. Лудянський, О.Б. Нетяга та ін // Збагачення корисних копалин: Респ. межвід. наук.-техн. зб. – 1988. – Вип. 38. – С. 67-71.

6. Єгоров П.А., Серго Є.Є. О термодинаміці процесу здрібнення. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 9(50). – С. 22-24.

7. Требования промышленности к качеству минерального сырья. Алюминий.

© Скляр Л.В., 2016

Надійшла до редколегії 19.08.2016 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Т.А. Олійник