

УДК 628.162.5

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Э.Р. Зверева¹, В.П. Плотникова², Ф.И. Бурганова¹, Л.О. Зверев³

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ПАО «ТГК-1», г. Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, г. Санкт-Петербург, Россия

belvira6@list.ru

***Резюме:** При комплексном обращении с золошлаковыми отходами ТЭЦ, возможно уменьшить негативное экологическое воздействие на окружающую среду, рационально распределить вторичные материальные ресурсы и отказаться от инвестиций в реконструкцию и строительство нового золошлакоотвала, получить чистую прибыль в 125 млн рублей в год от производства высококачественных экологически чистых бетонных изделий.*

***Ключевые слова:** утилизация золы, золошлаковые отходы, уголь, мазут.*

COMPLEX METHOD OF DISPOSAL OF ASH AND SLAG WASTE OF HEAT ELECTRIC POWER STATIONS

E.R. Zvereva¹, V.P. Plotnikova², F.I. Burganova¹, L.O. Zverev³

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²PJSC «TGC-1», St. Petersburg, Russia

³Saint Petersburg University of Industrial Technology and Design, Graduate School of Technology and Energy, St. Petersburg, Russia

belvira6@list.ru

***Abstract:** With complex treatment of ash and slag waste from CHP plants, it is possible to reduce the negative environmental impact on the environment, rationally distribute secondary material resources and abandon investment in the reconstruction and construction of a new ash dump and get a net profit of 125 million rubles a year from the production of high-quality environmentally friendly concrete products.*

***Keywords:** ash utilization, ash and slag waste, coal, fuel oil.*

Введение

Среди промышленных отходов одно из ведущих мест по объему выпуска занимают золы и шлаки от сжигания угля как основного или угля и мазута как резервного топлива тепловых электрических станций. С учетом растущих потребностей в электроэнергии и недостаточных темпов развития других источников ее производства, количество складываемых золошлаковых отходов будет возрастать.

Обеспечение экологически безопасного обращения с отходами является одной из

наиболее важных задач современности. В России действуют 172 тепловых электростанций на угольном топливе, ежегодно потребляющих более 65 млн. т. у. т. В золошлакоотвалах РФ, общей площадью 28 тыс. га, накоплено свыше 1,5 млрд. тонн золошлаковых отходов. Ежегодное образование ЗШО составляет 21-22 млн. тонн, при этом используется менее 6 млн тонн (27%) [1]. С каждым годом работы тепловых электростанций, увеличивается количество отходов, которые не вовлекаются во вторичный хозяйственный оборот, что приводит к выводу продуктивных сельскохозяйственных угодий и переполнению золошлакоотвалов.

Сложившаяся за десятилетия система обращения с отходами на территории нашей страны требует коренной перестройки от повсеместного захоронения в пользу эффективно применяемых в мировой экономике технологий ресурсосбережения, обработки, утилизации и обезвреживания таких отходов.

Достигнутый уровень мировой практики показывает, что главный эффект в решении проблемы отходов связан с их вовлечением в повторное использование. В европейских странах – лидерах отрасли утилизации и обезвреживания всех видов отходов, доля отходов, вовлеченных в повторное производство, составляет 80-87%, что значительно превышает аналогичный показатель в России и может являться ориентиром для создания российской отрасли промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов. Анализ научно-технической литературы показал, что ЗШО находят применение в производстве теплоизоляционных материалов, стеновых блоков, тротуарной плитки, строительных смесей, в дорожном строительстве и рекультивации нарушенных земель.

Согласно экспертной оценке, затраты на содержание 1 тонны золошлаковых отходов составляют от 400 до 700 руб., или 5-7% себестоимости производства электроэнергии и тепла на угольной ТЭС [2]. Инвестиции в реконструкцию одного золошлакоотвала могут достигать 1 млрд. рублей, стоимость строительства нового варьируется от 5 до 7 млрд. рублей.

В настоящее время существует множество методов, позволяющих утилизировать золошлаковые отходы, но практически отсутствуют комплексные технологии переработки золошлаковых отходов, позволяющие обеспечить при их крупнотоннажной переработке экологическую безопасность и экономическую выгоду.

Поэтому одной из важных задач энергетики на современном этапе является существенное повышение степени утилизации золошлаковых отложений с тем, чтобы разгрузить имеющиеся переполненные золоотвалы.

Сжигаемые на тепловых электрических станциях и котельных органические топлива, являются природными сорбентами, содержащими примеси многих ценных элементов, включая редкие металлы. При сжигании их содержание в золе возрастает многократно, и может представлять промышленный интерес.

По своим физико-химическим характеристикам золошлаковые отходы представляют собой ценное минеральное сырье, которое может использоваться в качестве природного сырья в строительной и химической промышленности, цементном производстве, сельском хозяйстве.

Золошлаковые отходы можно классифицировать как образующиеся при сжигании твердого топлива, мазута и нефтешлам.

Методы утилизации

Один из распространенных методов утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций – применение золошлака как сырья в различных отраслях промышленности, что позволит не только снизить экологическую нагрузку на прилегающие территории золоотвалов, но и принести существенную экономическую пользу. Для этого исходное золошлаковое сырье необходимо осушить и дополнительно измельчить до

необходимого помола и влажности 1% и добавления, при необходимости, на стадии измельчения специальных добавок. В дальнейшем полученное сырье можно использовать в качестве добавок, наполнителей, при производстве строительных изделий и в др. областях.

Также известна утилизация нефтешламов – высокотоксичных отходов производства путем перемешивания с добавлением рабочего агента, содержащего окись кальция и модификатор (в качестве модификатора применяют полные эфиры глицерина, растительные и минеральные масла и жиры, а также другие производные высших жирных кислот), дальнейшего нагревания. В конечном итоге нефтешламы превращаются в экологически чистый продукт – сухое сыпучее вещество, инертное по отношению к воде, воздуху и обладающее высокой механической прочностью, которое может быть использовано для рекультивации нарушенных земель и в дорожном строительстве.

Золашлаковые и шламовые отходы ТЭС в основном используются при производстве шлакощепня, шлакоситалов, керамической плитки, кирпича и других стройматериалов, а также фаянсовых изделий.

Однако их применение носит ограниченный характер, который обусловлен непостоянным составом золы и зависит от вида и качества добываемого топлива. Следует учитывать также, что золы, в основном, относятся к отходам четвертого класса опасности. На тепловых электростанциях и котельных наряду с другими видами топлива используется топочный мазут, при этом образуется летучая зола, опасная для окружающей среды, которая в настоящее время не утилизируется.

Целью настоящего исследования стал анализ состава золы для выявления их характерных особенностей и выбора оптимального метода их утилизации. Объектом исследования стала зола, образующаяся при сжигании мазута М100 Нижнекамского НПЗ с карбонатной присадкой и зола, образующаяся при сжигании каменных углей Апатитской ТЭЦ филиала «Кольский» ПАО «ТГК-1».

Образующиеся при сжигании мазута оксиды металлов, выбрасываемые в окружающую среду через дымовую трубу, являются высокотоксичными веществами, наносящими вред окружающей среде. Поэтому улавливание оксидов металлов и их последующая утилизация важны как для предотвращения их вредного воздействия, так и с целью дальнейшего использования в промышленности. В настоящее время в мазуты при сжигании добавляют специальные вещества – присадки, предназначенные для улучшения физико-химических характеристики эксплуатационных характеристик топлива. Как показал опыт лабораторных исследований и промышленных испытаний, применение присадок может способствовать образованию более рыхлой структуры отложений в зоне высокотемпературных поверхностей нагрева, что снижает коррозию этих поверхностей [3]. Нами разработаны присадки на основе обезвоженного карбонатного шлама [4-7], значительно улучшающие вязкостные характеристики топочного мазута, и при этом уменьшающие содержание оксидов серы в дымовых газах. Их совместное применение с присадками на основе предварительно диспергированных [8,9] углеродных нанотрубок [10,11], позволит добиться более полного сгорания топлива и более эффективного связывания высокотоксичных веществ с твердыми зольными остатками, пригодными для дальнейшей переработки.

На рис. 1 представлен химический состав зольных остатков, образующихся при сжигании мазута марки М100 с карбонатной присадкой, полученных при промышленных испытаниях на Набережночелнинской ТЭЦ АО «Татэнерго».



Рис. 1. Химический состав зольных остатков, образующихся при сжигании мазута М 100

Из этого анализа видно, что нефтешлам состоит из серы, кальция, ванадия, марганца, железе, никеля, цинка и молибдена. Элементный анализ выполнен масс-спектрометрией.

Были выполнены рентгendifракционные исследования образца в лаборатории ИОФХ им. А.Е.Арбузова КазНЦ РАН [12].

В процессе исследования было обнаружено, что анализируемый порошок достаточно хорошо магнитится, причем магнитная фаза составляет более половины массы образца. С целью разделения образца на магнитную (железосодержащую) и немагнитную фазы было использовано диспергирование образца в водной среде, интенсивное перемешивание до образования суспензии и отделение магнитной части с помощью сильного неодиевого магнита. После разделения образца на две фазы, для каждой из них был выполнен порошковый дифракционный эксперимент. Преимущественно немагнитная фаза 1 представляет собой смесь нескольких кристаллических фаз, главным образом состоящая из кристаллической формы оксида ванадия V_2O_5 , (код № 01-070-8747). Также в ней присутствуют в небольших количествах гипс $CaSO_4(H_2O)_2$, (код № 01-076-1746), гематит Fe_2O_3 (*syn*, код №01-089-8104), магнетит Fe_3O_4 (*syn*, код №01-089-3854). Обработка полученных данных выполнена с использованием пакета программ EVA [EVA v.11.0.0.3. User Manual. SOCABIM 2005]. Для идентификации кристаллических фаз были использована База данных порошковой дифрактометрии (ICDD PDF-2, Release 2005).

Минеральная часть золошлаковой смеси, образующейся при сжигании каменных углей Апатитской теплоэлектроцентрали на 98–99% состоит из свободных и связанных в химические соединения оксидов кремния, алюминия, титана, железа, кальция, магния, натрия, калия и серы. Усреднённый химический состав смеси представлен на рис. 2.

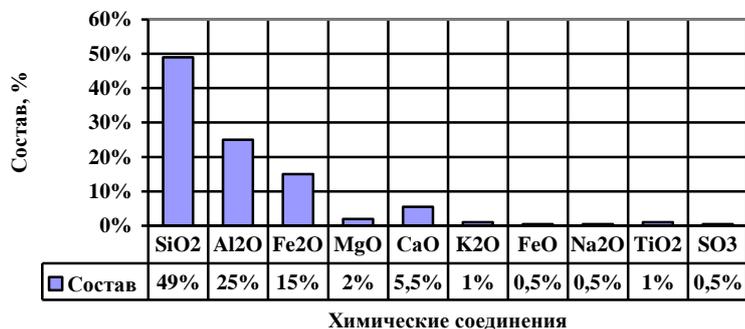


Рис. 2. Усреднённый химический состав смеси каменных углей Апатитской ТЭЦ ПАО «ТГК-1»

Гранулометрический состав золошлаковой смеси каменных углей Апатитской ТЭЦ имеет следующий вид:

1. гравийная фракция (10+2 мм) – 0,3 %;
2. песчаная фракция (2+0,05 мм) – 28,9 %;
3. пылеватая фракция (0,05+0,005 мм) – 68 %;
4. глинистая фракция (менее 0,005 мм) – 2,0 %.

Физико-механические свойства золошлаковой смеси каменных углей Апатитской ТЭЦ имеет следующий вид:

- удельный вес – 2,3 г/см³;
- плотность скелета сухой смеси – 1,04 г/г/см³;
- плотность сухой смеси в предельно-плотном состоянии – 1,2 г/г/см³;
- плотность сухой смеси в предельно-рыхлом состоянии – 0,9 г/г/см³;
- плотность в естественном залегании – 1,35 г/г/см³;
- пористость – 55%;
- коэффициент пористости – 1,21.

Исследования проб смеси, отобранных с различных участков поверхности золошлакоотвала, а также с различной глубины, в целом показали постоянство вещественного и зернового состава, что связано с использованием одного вида топлива, стабильностью технологии его подготовки и сжигания [13].

Результаты элементного, гранулометрического анализа, масс-спектрографии, рентгендифракционных исследований и других физико-химических методов исследований показали, что зольные остатки, образующиеся при сжигании мазута, состоят из широкого спектра полезных компонентов: кальция, ванадия, марганца, железа, никеля, цинка и молибдена в промышленно значимых концентрациях, а минералогия такова, что эти отходы могут являться ценным сырьем для различных отраслей промышленности. Дефицит минерального сырья, высокие цены на металлы и металлическую продукцию на мировом рынке, позволяют говорить о целесообразности извлечения металлов из зольных отходов ТЭС. Однако, развитие производства товарной продукции на основе переработки ЗШО сдерживается, главным образом, отсутствием технологий, обеспечивающих одновременно экологическую безопасность, экономическую эффективность и крупнотоннажную переработку этого вида отходов.

Мы предлагаем комплексную переработку золошлаковых отходов тепловых электрических станций, включающую технологическую схему переработки золошлаковых отходов с последующим извлечением полезных металлов и крупнотоннажной переработкой ЗШО с целью получения высококачественной, экологически безопасной бетонной продукции.

I стадия – сырьевая. На этом технологическом этапе ЗШО разделяются на фракции, извлекаются недожог, оксиды железа, микросферы и микродисперсные компоненты, состоящие, в основном, из оксидов кремния, алюминия, ванадия. Технологическая схема предлагаемого способа переработки золошлаковых отходов представлена на рис. 3. Золошлаковые отходы подвергают грохочению и за счет механического воздействия шлак распадается на фракции. Удаляется недожог. Оставшиеся обесшламленные золошлаковые отходы крупностью не более 0,5 мм направляют на магнитную сепарацию 1 стадии для отделения оксидов железа от золы. На 2 стадии магнитной сепарации магнитное поле становится сильнее, если на 1 стадии напряжение магнитного поля должна быть не более 100 кА/м, то на 2 стадии – не менее 600 кА/м. Для получения более качественного железосодержащего концентрата далее магнитные фракции проходят через первую винтовую сепарацию. Хвосты обесшламливают и направляют на вторую винтовую сепарацию, где легкая фракция представляет алюмосиликатный концентрат, а тяжелая направляется на концентрационный стол для извлечения ценных металлов [14-15].

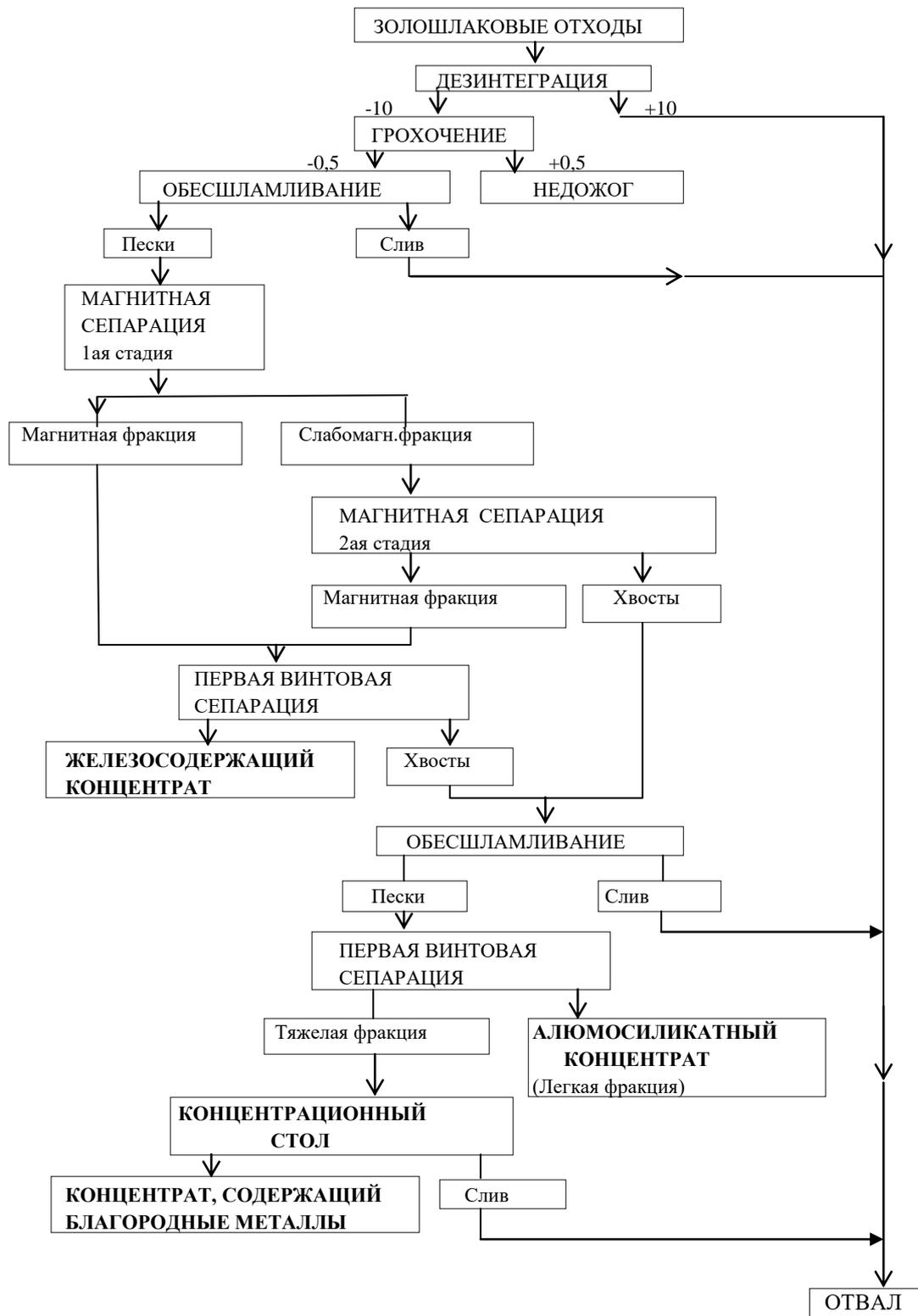


Рис. 3. Технологическая схема переработки золошлаковых отходов тепловых электростанций

II стадия – извлечение концентратов ценных и редких металлов. Дальнейшая переработка шлаков с целью извлечения из них полезных металлов возможна при использовании процессов экстракционных, сорбционных, методов гравитационного и электролитического осаждения. Переработка золошлаковых отходов наиболее эффективно производится следующими способами:

- 1) окислительным обжигом с поваренной солью или сильвинитом;
- 2) окислительным обжигом с содой;
- 3) хлорированием;
- 4) выщелачиванием золы.

Известны различные способы извлечения ценных элементов (включая редкоземельные) из зольно-шлаковых материалов, которые заключаются в химической обработке зольно-шлаковых материалов после сжигания углей различными химическими реагентами. Основным методом переработки зольно-шлаковых материалов является вскрытие их кислотными реагентами, в качестве которых могут использоваться минеральные кислоты.

Известен способ выщелачивания металлов и редкоземельных элементов (Y, La, Ce, Dy и др.) из зольно-шлаковых отходов растворами азотной, серной или соляной кислот в концентрации от 50 до 300 г/л при соотношении твердой и жидкой фаз от 1:3 до 1:10 и температуре от 18°C до 90°C [16]. Золы выщелачивали азотной кислотой при 90°C в течение 1 ч. Редкоземельные элементы экстрагировали из раствора трибутилфосфатом. Извлекалось до 80% редкоземельных элементов. Недостатком способа является использование высоких концентраций минеральных кислот, высокие затраты электроэнергии и экологическая опасность.

Известно выщелачивание зольно-шлаковых материалов различными концентрациями соляной кислоты при различных концентрациях (0,68-6,5) М, в диапазоне температур до 80°C, при разных плотностях пульпы [17]. При оптимальных условиях (3М HCl, 40°C, Т:Ж=1:5) Sc извлекался на 84%, Y - на 91%. Удавалось достигнуть концентраций Sc - 84 мг/л, Y - 91 мг/л. Недостатком способа является использование концентрированных растворов соляной кислоты.

Известен также способ извлечения редких и редкоземельных элементов из бедной руды, содержащей пирит в разных растворах и в разных режимах [18]. Использовали разное время выщелачивания, добавление 0,5 г/л Fe₂(SO₄)₃; применяли в качестве растворителя среду 9К Сильвермана и Лундгрена без железа [19]. В оптимальных условиях (pH 3,5, 0,5 г/л Fe³⁺) за 52 недели было выщелочено 58% U, 50% Th, 36% Y и 45% редкоземельных элементов. Показано, что при добавлении питательных солей может происходить «самовыщелачивание» редкоземельных элементов из руды благодаря микробному окислению пирита. Это единственный из известных нам патентов, где упоминается роль микроорганизмов в выщелачивании редкоземельных элементов, но не из отходов сжигания углей, а из бедной руды, содержащей пирит – источник энергии для микроорганизмов.

В настоящее время имеются эффективные технологические решения, позволяющие качественно перерабатывать золошлаковые отходы с целью извлечения из них, например, с помощью выщелачивания, золота, титана, лития, бериллия, ванадия, вольфрама, меди, марганца, цинка, редкоземельных элементов и др. [20-24].

Суммарная себестоимость получения 1 т редких металлов из руд, например циркония, составляет в среднем 200 000 \$/т, или более 12 000 млн. руб./т. Суммарная себестоимость получения металлов (Ti, V, Ga) из золошлаковых отходов методом термохлорирования, например, в среднем составит 80 000 \$/т, или ≈ 5 000 млн. руб./т. Очевидно, что себестоимость извлечения редких металлов из зол гораздо ниже, чем промышленное получение этих металлов из руд. Значителен здесь и социально-экологический эффект, определяемый улучшением экологии, созданием рабочих мест и т.д.

III стадия – крупнотоннажная переработка ЗШО. На этой стадии, оставшуюся часть ЗШО рекомендуется использовать для производства бетонных изделий методом вибропрессования материалов для дорожной и цементной отраслей. Преимущества этого метода в том, что можно создать изделия с достаточно высокими показателями морозостойкости ($-300F$ и менее), низким уровнем водопоглощения (менее 5%), четкими геометрическими формами и стабильностью характеристик. Метод вибропрессования позволяет изготовить различные строительные материалы от тротуарной плитки до стенового камня. Также данная технология дает возможность экономить пигмент, с помощью изготовления двухслойной тротуарной плитки.

Тротуарная плитка на основе ЗШО по своим прочностным и эксплуатационным характеристикам не уступает бетонной плитке и полностью соответствует ГОСТу 17608-91 «Плиты бетонные тротуарные». За счет эффективного использования современного технологического оборудования, автоматизации производственных процессов, максимального использования вторичного материального ресурса, завод по производству тротуарной плитки из ЗШО обеспечит доступные и конкурентные цены на продукцию.

Производственная мощность установки – 1 682 тыс. м² продукции в год, с возможностью пустотелый, камень бордюрный. Объем перерабатываемых золошлаковых отходов – от 71 тыс. до 128 тыс. тонн в увеличения до 2 523 тыс. м² в год. Виды готовой продукции – тротуарная плитка, камень, что позволит не только снизить динамику образования отходов, но и уменьшить объем размещенных ЗШО в золоотвале. На рис. 4 приведен пример опытно-промышленной установки.



Рис. 4. Пример опытно-промышленной установки.

На основании технико-коммерческих предложений оборудования и строительных материалов составлен бизнес- план строительства завода и проведен сравнительный анализ чистой прибыли в зависимости от вида выпускаемой продукции (тротуарная плитка, бордюрный камень, пустотелый стеновой камень). Переменные затраты проекта включают в себя: стоимость компонентов золошлаковой смеси, сухую переалку ЗШО,

автопогрузочные работы, транспортировка продукции, хранение на складе. В постоянные затраты входят: фонд оплаты труда обслуживающего персонала, эксплуатация производственного помещения, амортизация, реклама, сертификация, аренда земли, упаковка, косвенные затраты. Необходимые ресурсы планируется закупать у организаций, расположенных в регионе, и доставляться автомобильным транспортом. Инвестиции в строительство завода составят 120 млн. рублей.

Анализируя финансово-экономические показатели проекта, можно прийти к выводу, что предприятие является перспективным с точки зрения инвестирования. Такие показатели как дисконтированный период окупаемости (2,39 лет) и индекс прибыльности (4,86) показывают, что проект можно считать не только прибыльным, но и эффективным.

Чистый дисконтированный доход (463 526 тыс. руб.) говорит о целесообразности реализации инвестиций. Это же подтверждает внутренняя норма рентабельности (115,2%), которая значительно выше требуемой нормы доходности.

Анализ предельных значений показал, что чистый дисконтированный доход наиболее чувствителен к изменению цены сбыта. Учитывая, что цена заложена не максимальная и допустимое отклонение 18,9%, можно не опасаться убытков от инвестирования.

При этом в качестве горизонта реализации проекта выбран период в 6 лет, в то время, как товарная продукция будет пользоваться спросом и по прошествии данного срока, поэтому действие проекта можно продлить для получения прибыли в дальнейшем.

Вывод

В заключение можно сделать вывод, что при комплексном обращении с золошлаковыми отходами ТЭЦ, возможно уменьшить негативное экологическое воздействие на окружающую среду, рационально распределить вторичные материальные ресурсы и отказаться от инвестиций в реконструкцию и строительство нового золошлакоотвала в 7 млрд. рублей, и получить чистую прибыль в 125 млн. рублей в год от производства высококачественных, экологически чистых бетонных изделий. Перспективно развитие малых предприятий по переработке техногенных отходов, которые могут работать в составе больших энергетических предприятий. Годовой выход золы на них составляет несколько сотен тысяч тонн золы, из которой можно получать несколько тысяч тонн концентрата, пригодного для переработки с целью выделения ценных металлов, востребованных на предприятиях электротехнического машиностроения, металлургии, и производства качественной, экологически чистой бетонной продукции.

Литература

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии», ИТС-368-2017. М.: Бюро НДТ, 2017. 271 с.
2. Цыльковский Ю.К. Утилизация золошлаковых материалов угольных тепловых электростанций России / Под ред. А.Г. Тумановского. М.: ВТИ, 2003. 132 с.
3. Козлов И.М., Чернышев Е.В., Кочуров С.Н., и др. Применение новых технологий при переработке золошлаковых отходов на ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» // Электрические станции. 2005 г., №11. С.22-26.
4. Зверева Э.Р., Дмитриев А.В., Шагеев М.Ф., и др. Результаты промышленных испытаний карбонатной присадки к мазуту // Теплоэнергетика. 2017. № 8. С. 50-56.
5. Зверева Э.Р., Мингалеева Г. Р., Хабибуллина Р. В., и др. Улучшение вязкостных характеристик котельного топлива присадками // Нефтехимия. 2016. Т.56. №1. С.73-75.
6. Zvereva E.R., Zueva O.S., Khabibullina R.V. Improvement of Liquid Organic Fuel Oils Operational Characteristics with Additives // Mater. Sci. Forum. 2016. Vol. 870. pp. 666-670.

7. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В., и др. Повышение показателей качества котельного топлива при использовании присадок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 28-36.
8. Zvereva E.R., Khabibullina R.V., Akhmetvalieva G.R., et al. Influence of Nanoadditives on Rheological Properties of Fuel Oil // Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. pp. 914-920.
9. Zvereva E.R., R.V. Khabibullina, Zueva O.S. Nano Additives Influence on Fuel Oil Properties // Solid State Phenomena. 2017. Vol. 265. pp. 374-378.
10. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В., и др. Воздействие на реологические характеристики жидкого котельного топлива присадок, включающих углеродные нанотрубки // Химия и технология топлив и масел. 2016. № 5 (597). С. 15-19.
11. Zvereva E.R., Zueva O.S., Khabibullina R.V., et al. Nanomaterial Effect Study in the Viscosity Characteristics of Fuel Oil and Alternative Fuels Used at Fuel and Energy Complex Enterprises // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 11. pp. 2950-2954.
12. Зверева Э.Р., Хабибуллина Р.В., Макарова А.О., и др. Изменение реологических свойств тяжелого котельного топлива при добавлении углеродных нанотрубок и обезвоженного карбонатного шлама // Нефтехимия. 2019. Т. 59. № 1. С. 98-103.
13. Зверева Э.Р., Шагеев М.Ф., Дмитриев А.В., и др. Использование золошлаковых отходов, образующихся при сжигании мазутов на тепловых электрических станциях // Вестник КГЭУ. 2018. Том 10. №1(37). С. 64-73.
14. Балбукова Е.В. Снижение динамики накопления золошлаковых отходов и производство товарной продукции из золошлаков Апатитской ТЭЦ филиала «Кольский» ПАО «ТГК-1» // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли. М.: Министерство энергетики Российской Федерации, ООО «Технологии развития», 2019.
15. Ващук В.И., Меламед Б.Г., Калинин Н.Ф., и др. Производственный комплекс по переработке и утилизации нефтешламов. Патент РФ на изобретение № 76252. 20.09.2008. Бюл. № 26. Доступно по: <https://patents.google.com/patent/RU76252U1/ru>. Ссылка активна на 01 июня 2019.
16. Прокопьев С.А., Болотин М.Л. Способ комплексной переработки золошлаковых отходов (варианты). Патент РФ на изобретение № 2588521. 27.06.2016. Бюл. №18. Доступно по: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2588/2588521/patent-2588521.pdf. Ссылка активна на 01 июня 2019.
17. Кузьмин В.И., Пашков Г.Л., Карцева Н.В., и др. Способ извлечения редкоземельных металлов и иттрия из углей и золошлаковых отходов от их сжигания. Патент РФ на изобретение №2293134. Опубликовано 10.02.2007. Бюл. №4. Доступно по: <http://www.freepatent.ru/images/patents/175/2293134/patent-2293134.pdf>. Ссылка активна на 01 июня 2019.
18. Концевой А.А., Михнев А.Д., Пашков Г.Л., и др. Извлечение скандия и иттрия из золошлаковых отходов // Журнал прикладной химии. 1995. Т. 68. №7. С. 1075.
19. Sapsford D.J., Bowell R.J., Geroni J.N., et al. Factors influencing the release rate of uranium, thorium, yttrium and rare earth elements from a low grade ore // Minerals Engineering. 2012. Vol. 39. pp. 165-172
20. Silverman M.P., Lundgren D.C. Study on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*. An improved medium and harvesting procedure for securing high cell yield // J. Bacteriol. 1959. Vol. 77. №5. pp. 642-647.
21. Веселовская Е.В. Исследование структуры и особенностей адсорбционных взаимодействий на поверхности энергетических углей // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2017. № 2(194). С. 40-45.
22. Русакова М.В., Белосельский Б.С., Зайцев А.Н. Экстрагирование соединений ванадия из ванадийсодержащих шламов ТЭС // Теплоэнергетика. 2003. №5. С. 71-75.
23. Слотвинский-Сидак Н. П., Жуковский Т.Ф. Утилизация ванадийсодержащих отходов

ТЭС // Теплоэнергетика. 1997. № 2. С. 55-58.

24. Яценко Е.А., Земляная Е.Б., Ефимов Н.Н. и др. Разработка ресурсосберегающей технологии шлакоситаллов путем переработки золошлаковых отходов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2010. № 2. С.123-127.

Авторы публикации

Зверева Эльвира Рафиковна – докт. техн. наук, профессор кафедры «Технология воды и топлива», Казанский государственный энергетический университет. Email: belvira6@list.ru.

Плотникова Виктория Павловна – канд. экон. наук, начальник центра – начальник отдела развития персонала, Учебный центр ПАО «ТГК-1», Санкт-Петербург.

Бурганова Фирюза Ильсуровна – магистрант кафедры «Технология воды и топлива», Казанский государственный энергетический университет.

Зверев Леонид Олегович – студент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

References

1. Informacionno-tehnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam «Szhiganie topliva na krupnyh ustanovkakh v celyah proizvodstva energii», ITS-368-2017. Moscow: Byuro NDT, 2017. 271 p. (In Russ).
2. Tselykovsky YuK; Tumanovsky AG, editor. *Utilizaciya zoloshlakovyh materialov ugol'nyh teplovyh elektrostancij Rossii*. Moscow: VTI, 2003. 132 p. (In Russ).
3. Kozlov IM, Chernyshev EV, Kochurov SN, et al. Primenenie novyh tekhnologij pri pererabotke zoloshlakovyh othodov na TEC-22 ОАО «Mosenergo». *Electrical stations*. 2005; 11:22-26. (In Russ).
4. Zvereva ER, Dmitriev AV, Shageev MF, et al. Results of Industrial Tests of Carbonate Additive to Fuel Oil. *Thermal Engineering*. 2017. 64(8):50-56. (In Russ).
5. Zvereva ER, Mingaleeva GR, Khabibullina RV, et al. Improving in the Viscosity Characteristics of Boiler Oil by Additives. *Petroleum Chemistry*. 2016; 56(1):73-75. (In Russ).
6. Zvereva ER, Zueva OS, Khabibullina RV. Improvement of Liquid Fuel Oils Operational Characteristics with Additives. *Mater. Sci. Forum*. 2016; 870:666-670.
7. Zvereva ER, Zueva OS, Khabibullina RV, et al. Improving the quality of boiler fuel when using additives. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems*. 2016; 1-2:28-36. (In Russ).
8. Zvereva ER, Khabibullina RV, Akhmetvalieva GR, et al. Influence of Nanoadditives on Rheological Properties of Fuel Oil. *Advances in Engineering Research*. 2017; 133:914-920.
9. Zvereva ER, Khabibullina RV, Zueva OS. Nano Additives Influence on Fuel Oil Properties. *Solid State Phenomena*. 2017; 265:374-378.
10. Zvereva, ER, Zueva, OS, Khabibullina, R.V. et al. Effects on the rheological characteristics of liquid boiler fuel additives, including carbon nanotubes. *Chemistry and technology of fuels and oils*. 2016; 5(597):15-19. (In Russ).
11. Zvereva ER, Zueva OS, Khabibullina RV, et al. Fluorophoresis in the use of oil and fuel and / or chemicals and oil refineries. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 11:2950-2954.
12. Zvereva ER, Khabibullina RV, Makarova AO, et al. Modification of the Rheological Properties of Heavy Boiler Fuel by Adding Carbon Nanotubes and Dehydrated Carbonate Sludge. *Petroleum Chemistry*. 2019; 59(1):98-103. (In Russ).

13. Zvereva ER, Dmitriev AV, Shageev MF, et al. The use of ash and slag waste generated during the combustion of fuel oil at thermal power plants. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2018; 1(37):64-73. (In Russ).

14. Balbukova EV. Snizhenie dinamiki nakopleniya zoloshlakovyh othodov i proizvodstvo tovarnoj produkcii iz zoloshlakov Apatitskoj TEC filiala «Kol'skij» PAO «TGC-1». *Sbornik rabot laureatov mezhdunarodnogo konkursa nauchnyh, nauchno-tehnicheskikh i innovacionnyh razrabotok, napravlennyh na razvitie toplivno-energeticheskoy i dobyvayushchej otrasli*. Moscow: Ministry of Energy of the Russian Federation, Development Technologies LLC, 2019.

15. Vashchuk VI, Melamed BG, Kalinin NF, et al. *Proizvodstvennyj kompleks po pererabotke i utilizacii nefteshlamov*. Patent RUS №76252. 20.09.2008. Bul.№26. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU76252U1/ru>. Accessed: 01 Jun 2019. (In Russ).

16. Prokopiev SA, Bolotin ML. *Sposob kompleksnoj pererabotki zoloshlakovyh othodov (varianty)*. Patent RUS №2588521. 27.06.2016. Bul. №18. Available at: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2588/2588521/patent-2588521.pdf. Accessed 01 Jun 2019. (In Russ).

17. Kuzmin VI, Pashkov GL, Kartseva NV, et al. *Sposob izvlecheniya redkozemel'nyh metallov i ittriya iz uglej i zoloshlakovyh othodov ot ih szhiganiya*. Patent RUS №2293134. 10.02.2007. Bul.№4. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/175/2293134/patent-2293134.pdf>. Accessed: 01 Jun 2019. (In Russ).

18. Kontsevoy A.A., Mikhnev A.D., Pashkov G.L., Kolmakova L.P. Extraction of scandium and yttrium from ash and slag waste. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 1995; 68(7):1075. (In Russ).

19. Sapsford DJ, Bowell RJ, Geroni JN., et al. Thorium, yttrium and low-grade ore. *Minerals Engineering*. 2012; 39:165-172.

20. Silverman MR, Lundgren DC. Study on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*. An improved medium yield and harvesting procedure for securing high cell yield. *J. Bacteriol*. 1959; 77(5):642-647.

21. Veselovskaya E.V. Investigation of structure and features of surface adsorption interactions of power-generating coals. *University news. North-caucasian region. Technical sciences series*. 2017; 2:40-45. DOI:10.17213/0321-2653-2017-2-40-45. (In Russ).

22. Rusakova MV, Beloselsky BS, Zaitsev AN. Extraction of vanadium compounds from vanadium-containing slimes of thermal power plants. *Thermal Engineering*. 2003; 5:71-75. (In Russ).

23. Slovinsky-Sidak NP, Zhukovsky TF. Utilization of vanadium-containing waste TPP. *Thermal engineering*. 1997; 2:55 -58. (In Russ).

24. Yatsenko EA, Zemlyanaya EB, Efimov NN, et al. Development of resource-saving technology of slag coal by processing of ash and slag waste. *University news. North-caucasian region. Technical sciences series*. 2010; 2:123-127. (In Russ).

Authors of the publication

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: 6elvira6@list.ru.

Victoria P. Plotnikova – Department of the Training Center of TGC-1 PJSC, St. Petersburg, Russia.

Firyuza I. Burganova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Leonid O. Zverev – St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Graduate School of Technology and Energy, St. Petersburg, Russia.

Поступила в редакцию

13 июня 2019 г.