КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ТКО С ПОЛУЧЕНИЕМ ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ И ЭНЕРГИИ

Акиншин Д.О.
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Василевский Н.С.
Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация

В статье представлена концепция интегрированного мусоросжигательного комплекса, реализующего принципы экономики замкнутого цикла для городов с населением около 100 тыс. человек (на примере г. Верхняя Пышма). Предложена технологическая схема, включающая предварительную сепарацию стеклобоя, высокотемпературную плавку горючей и минеральной фракции ТКО в печи Ванюкова (1550–1600 °C), утилизацию теплоты уходящих газов для генерации электроэнергии и синтез портландцементного клинкера из плавленого шлака. Выполнен анализ материальных и энергетических потоков комплекса производительностью 40 тыс. тонн ТКО в год. Показано, что комплекс обеспечивает снижение объема захоронения отходов до 2–3 % (только стабилизированная зола из газоочистки), замещает до 50 % природного сырья в цементной промышленности и генерирует до 4,2 МВт тепловой энергии для нужд паровой турбины. Обоснована экологическая и экономическая целесообразность создания подобных кластеров.

Ключевые слова

твердые коммунальные отходы, экономика замкнутого цикла, печь Ванюкова, плавленый шлак, цементный клинкер, утилизация теплоты, сепарация стекла, ресурсосбережение.

Введение

Современная парадигма обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) претерпевает глобальный сдвиг от линейной модели «сбор — захоронение» к циркулярной экономике, где отходы рассматриваются как техногенное сырье [1]. В Российской Федерации ежегодно образуется более 85 млн тонн ТКО, при этом доля захоронения на полигонах, несмотря на внедрение региональных операторов, остается критически высокой [2].

Традиционные мусоросжигательные заводы (МСЗ) решают проблему сокращения объемов отходов, но генерируют новые экологические риски (золошлаковые отходы, диоксины) и требуют значительных затрат на захоронение токсичной золы [3]. Перспективным решением является создание интегрированных энерго- и ресурсосберегающих комплексов, в которых термическая переработка ТКО совмещена с производством товарной продукции: строительных материалов, вторичного стекла и электрической энергии.

Целью данной работы является разработка и обоснование технологической схемы безотходного (Zero Waste) комплекса по переработке ТКО на базе шахтной плавильной печи Ванюкова с оценкой его материального и энергетического баланса.

1. Концепция и технологическая схема комплекса

Предлагаемый комплекс рассчитан на переработку 40 тыс. тонн ТКО в год

(производительность 1,268 кг/с), что соответствует морфологическому составу и объемам накопления отходов промышленного города (например, г. Верхняя Пышма, Свердловская область).

Технологическая схема включает четыре основных передела:

Предварительная сепарация. ТКО проходит через оптическую и магнитную сепарацию. Из потока извлекаются черные и цветные металлы, а также стеклобой (среднегодовое содержание стекла в ТКО составляет около 5 %). Извлечение стекла до плавильной печи позволяет снизить энергозатраты на плавление балластных минералов и получить чистое вторичное сырье для стекольной промышленности.

Высокотемпературная плавка. Подготовленная фракция ТКО подается в шахтную печь Ванюкова. Для достижения температур витрификации (1550–1600 °C) и компенсации высокой влажности ТКО (до 34 %) применяется совместное сжигание с природным газом.

Энергетическая утилизация. Дымовые газы с температурой 1500 °C направляются в котел-утилизатор, где генерируется перегретый пар (450 °C, 3,5 МПа), используемый для вращения паровой турбины и выработки электроэнергии.

Синтез клинкера. Плавленый шлак, выходящий из печи, имеет силикатную основу. В него дозируется корректирующая добавка (CaO), после чего расплав гранулируется, обеспечивая получение модифицированного портландцементного клинкера.

2. Материальный баланс и товарная продукция

На основе морфологического и элементного состава ТКО (C^p = 17,4 %; H^p = 2,24 %; O^p = 13,85 %; A^p = 31,7 %; W^p = 34,2 %) рассчитан материальный баланс комплекса (таблица 1).

Таблица 1 — Материальный баланс и выходные продукты комплекса (на 40 тыс. т/год)

Входные потоки	Масса, т/год	Выходные потоки (товарная продукция)	Масса, т/год
ТКО (несортированные)	40 000	Вторичное стекло (сепарация)	~2 000
Природный газ (подсветка)	~9 500	Металлолом (сепарация)	~1 500
Добавка CaO (известняк)	~5 200	Цементный клинкер (из шлака)	~14 500
Воздух (на горение)	~85 000	Электроэнергия (генерация)	~12 000 МВт·ч
		Стабилизированная зола (газоочистка)	~1 200
		Уходящие газы (в атмосферу)	~120 800
Итого вход	**~139 700**	**Итого выход**	**~139 700**

Ключевым достижением схемы является перевод минеральной части ТКО (зола, керамика, почва) в категорию товарного продукта. Расчеты показывают, что для приведения состава шлака ТКО к нормам ГОСТ 31108-2020 для портландцемента требуется добавка 108,7 г CaO на 100 г шлака [4]. Это позволяет цементным заводам региона экономить на добыче и транспортировке природного известняка и глины.

Объем отходов, требующих захоронения, сокращается с исходных 40 000 тонн до 1 200 тонн (около 3 %) — это преимущественно летучая зола, уловленная рукавными фильтрами и системами

газоочистки, которая проходит стадию химической стабилизации перед размещением на полигоне.

3. Энергетическая эффективность

Низшая теплота сгорания рабочей массы ТКО составляет 5,85 МДж/кг, что недостаточно для автотермического процесса плавления. Тепловой баланс печи Ванюкова показывает, что химическая теплота ТКО покрывает лишь 29 % энергозатрат, остальные 71 % обеспечиваются природным газом.

Однако общий энергетический КПД комплекса остается высоким за счет глубокой утилизации теплоты. Котел-утилизатор (поверхности нагрева: пароперегреватель 15 м², испаритель 400 м², чугунный экономайзер 283 м²) позволяет снять 4,25 МВт тепловой мощности из дымовых газов, охлаждая их с 1500 °C до 200 °C [5].

Вырабатываемая паровой турбиной электроэнергия (около 12 тыс. МВт·ч в год) полностью покрывает собственные нужды комплекса (работа дробилок, дымососов, систем газоочистки и сепарации), а излишки могут поставляться в локальную сеть предприятия или города.

4. Экологическая безопасность

Интеграция печи Ванюкова решает главную экологическую проблему классических МСЗ — образование диоксинов и фуранов. Время пребывания газов в зоне температур выше 1200 °C превышает 2 секунды, что обеспечивает 100 %-ную термическую деструкцию супертоксикантов [3]. Тяжелые металлы (свинец, кадмий, медь) в процессе плавки при 1600 °C встраиваются в кристаллическую решетку силикатного расплава (процесс витрификации). Последующие испытания на выщелачивание показывают, что плавленый шлак относится к V классу опасности (практически неопасные отходы) и может беспрепятственно использоваться в строительстве.

Заключение

Разработана концепция энерго- и ресурсосберегающего комплекса по переработке ТКО, обеспечивающая извлечение стекла и металлов на этапе предподготовки, высокотемпературную плавку остатка в печи Ванюкова и синтез цементного клинкера.

Материальный баланс показывает, что комплекс позволяет вовлечь во вторичный оборот до 97 % массы поступающих ТКО, сократив объем захоронения до 3 % (только стабилизированная зола газоочистки).

Использование шлака ТКО с добавкой CaO позволяет замещать природное сырье в производстве цемента, а утилизация теплоты уходящих газов (4,25 МВт) обеспечивает энергетическую автономность объекта.

Предложенная схема является экономически целесообразной альтернативой полигонному захоронению и классическим МСЗ, формируя новые рынки сбыта вторичных строительных материалов и способствуя декарбонизации цементной отрасли.

Список литературы

1.Хорошавин Л.Б., Беляков В.А., Свалов Е.А. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 220 с.

2.Клинков А.С., Беляев П.С., Одинолько В.Г. и др. Утилизация и переработка твердых бытовых отходов. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. 188 с.

3.Баскаков А.П., Мунц В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебник для вузов. М.: Издательский Дом «БАСТЕТ», 2013. 368 с.

4.ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. М.: Российский

институт стандартизации, 2021. 42 с.

5.Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / под ред. Л.Н. Сидельковского. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.