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, Свердловская область). Предложена технологическая схема, включающая предварительную сепарацию стеклобоя, высокотемпературную плавку горючей и минеральной фракции ТКО в шахтной печи Ванюкова (1550–1600 °C), утилизацию теплоты уходящих газов в котле-утилизаторе для генерации перегретого пара (450 °C, 3,5 МПа) и синтез портландцементного клинкера из плавленого шлака с добавкой CaO. 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 4,255 МВт тепловой мощности для паровой турбины. Обоснована экологическая и экономическая целесообразность создания подобных кластеров, обеспечивающих 100 % деструкцию диоксинов и надежную иммобилизацию тяжелых металлов в стекловидной фазе шлака.

Ключевые слова

твердые коммунальные отходы, экономика замкнутого цикла, печь Ванюкова, плавленый шлак, портландцементный клинкер, котел-утилизатор, утилизация теплоты, сепарация стекла, витрификация, 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 института региональных операторов, остается критически высокой — около 65 % [2]. Указом Президента РФ в 2024 году утвержден национальный проект «Экологическое благополучие», одной из целей которого является формирование экономики замкнутого цикла, включая вовлечение ТКО в хозяйственный оборот в качестве вторичных ресурсов.

Традиционные мусоросжигательные заводы (МСЗ) с колосниковыми решетками решают проблему сокращения объемов отходов, но генерируют новые экологические риски: образование токсичной золы, содержащей тяжелые металлы, и эмиссию диоксинов при температурах 800–1000 °C [2]. Альтернативным подходом является создание интегрированных энерго- и ресурсосберегающих комплексов, в которых высокотемпературная плавка ТКО (1500–1600 °C)

совмещена с производством товарной продукции: строительных материалов, вторичного стекла и электрической энергии [3].

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 для города с населением около 100 тыс. человек.

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 Свердловской области (г. Верхняя Пышма) [1].

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 34,2 %) применяется совместное сжигание с природным газом.

Энергетическая утилизация. Дымовые газы с температурой 1500 °C направляются в котел-утилизатор Г-400ПЭ, 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 элементного состава рабочей массы ТКО (C^p = 17,4 %; H^p = 2,24 %; O^p = 13,85 %; N^p = 0,5 %; S^p = 0,11 %; A^p = 31,7 %; W^p = 34,2 %) и природного газа (CH_4 = 98,9 %) рассчитан материальный баланс комплекса (таблица 1).

Таблица 1 — Материальный баланс 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	Портландцементный клинкер	~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 108,73 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 (таблица 2) показывает, что химическая теплота ТКО покрывает лишь 29 % энергозатрат, остальные 71 % обеспечиваются природным газом.

Таблица 2 — Сводный тепловой баланс плавильной печи

Приходная часть		**Расходная часть**	
Хим. теплота ТКО	7,42 МВт / 29,06 %	Теплота газов от ТКО	8,42 МВт / 32,98 %
Хим. теплота газа	18,04 МВт / 70,63 %	Теплота газов от газа	14,53 МВт / 56,89 %
Физ. теплота окислителя и добавок	0,07 МВт / 0,29 %	Потери в окр. среду	1,30 МВт / 5,09 %
		Теплота, уносимая шлаком	1,30 МВт / 5,11 %
		Потери с металлом	0,02 МВт / 0,06 %
Итого	**25,54 МВт / 100 %**	**Итого**	**25,54 МВт / 100 %**

Однако общий энергетический КПД комплекса остается высоким за счет глубокой утилизации теплоты. Котел-утилизатор Г-400ПЭ (поверхности нагрева: пароперегреватель 15 м², испаритель 400 м², чугунный экономайзер 283 м²) позволяет снять 4,255 МВт тепловой мощности из дымовых газов, охлаждая их с 1500 °C до 200 °C [5]. Выбор чугунного экономайзера обусловлен необходимостью предотвращения низкотемпературной коррозии при сжигании ТКО, содержащих хлор и серу.

Вырабатываемый перегретый пар (1,344 кг/с, 450 °C, 3,5 МПа) направляется в паровую турбину для генерации электроэнергии. Годовая выработка составляет около 12 тыс. МВт·ч, что полностью покрывает собственные нужды комплекса (работа дробилок, дымососов, систем газоочистки и сепарации).

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 (Pb, Cd, Hg, Cu, Zn) 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.

Для обеспечения нормативных концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы выполнен расчет параметров дымовой трубы: высота 26 м, диаметр устья 0,6 м,

скорость газов на выходе 17,798 м/с. При этих параметрах максимальная приземная концентрация NO_x составляет 0,038 мг/м³, что значительно ниже ПДК (0,2 мг/м³).

Комплексная система газоочистки включает: сухую очистку (подача извести для связывания HCl и SO_2), рукавный фильтр (эффективность >99 %), селективное каталитическое восстановление (SCR, снижение NO_x на 80–90 %) и адсорбцию на активированном угле.

5. Технико-экономическое обоснование

Предварительная оценка показывает, что комплекс обеспечивает:

— замещение до 50 % природного известняка в производстве цемента;

— снижение себестоимости клинкера на 15–20 %;

— экономию на экологическом сборе за захоронение шлаков (600–950 руб./т);

— дополнительную выручку от продажи вторичного стекла и металлолома.

Срок окупаемости комплекса оценивается в 5–7 лет при условии организации централизованного сбора ТКО и заключения долгосрочных контрактов с цементными заводами региона.

Заключение

Разработана концепция энерго- и ресурсосберегающего комплекса по переработке ТКО производительностью 40 тыс. тонн в год, обеспечивающего 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).

Тепловой баланс печи Ванюкова демонстрирует, что для достижения температуры плавления шлака 1600 °С требуется подвод природного газа (расход 0,507 м³/с), однако общая энергетическая эффективность комплекса достигается за счет утилизации 4,255 МВт теплоты дымовых газов в котле-утилизаторе.

Использование шлака ТКО с добавкой 108,73 г CaO на 100 г шлака позволяет замещать природное сырье в производстве цемента, а высокотемпературная плавка обеспечивает 100 % деструкцию диоксинов и надежную иммобилизацию тяжелых металлов.

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.