ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ВАНЮКОВА ПРИ СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ И ПРИРОДНОГО ГАЗА

Акиншин Д.О.,

Валинеева А.А.
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Аннотация

Термическая переработка твердых коммунальных отходов (ТКО) с получением плавленого шлака является перспективным направлением ресурсосбережения, позволяющим использовать минеральную часть отходов в качестве сырья для производства цементного клинкера. Однако высокая зольность и влажность ТКО не позволяют достичь температур плавления шлака (1550–1600 °С) в режиме автотермичности. В работе представлен расчет материального и теплового баланса плавильной шахтной печи Ванюкова при совместном сжигании ТКО и природного газа. Установлено, что химическая теплота ТКО покрывает лишь 29 % энергозатрат на процесс, а для поддержания заданного температурного режима требуется подвод природного газа. Обосновано, что несмотря на затраты газа, применение печи Ванюкова обеспечивает полную деструкцию диоксинов и витрификацию тяжелых металлов, а полученный плавленый шлак обладает высокой экономической ценностью как замена традиционного цементного сырья.

Ключевые слова

твердые коммунальные отходы, печь Ванюкова, плавленый шлак, цементный клинкер, тепловой баланс, совместное сжигание, витрификация, энергетическая эффективность.

Введение

Ежегодный объем образования твердых коммунальных отходов (ТКО) в Российской Федерации превышает 85 млн тонн, при этом более 60 % отходов размещается на полигонах, что создает значительную нагрузку на окружающую среду [1]. Переход к экономике замкнутого цикла требует внедрения технологий, обеспечивающих не только объемное уменьшение отходов, но и извлечение из них вторичных материальных ресурсов.

Традиционные мусоросжигательные заводы (МСЗ) с колосниковыми решетками работают при температурах 800–1000 °С. Образующийся при этом шлак имеет неоднородный состав, содержит токсичные тяжелые металлы и не может быть использован в строительстве без дополнительной дорогостоящей обработки [2]. Альтернативой является высокотемпературная плавка (1500–1600 °С), при которой происходит витрификация (остекловывание) минеральной части, надежная иммобилизация тяжелых металлов и полная термическая деструкция супертоксикантов (диоксинов и фуранов) [3]. Полученный плавленый шлак по химическому составу близок к портландцементному клинкеру и может быть использован для производства цемента после введения корректирующих добавок (например, CaO) [4].

Для осуществления процесса плавки наиболее перспективным является использование шахтных плавильных печей, в частности, печи Ванюкова, адаптированной для переработки влажных и зольных отходов. Целью данной работы является анализ термодинамических процессов

и составление теплового баланса печи Ванюкова при совместном сжигании ТКО и природного газа для оценки энергетической эффективности технологии.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является процесс термической переработки ТКО в плавильной печи Ванюкова с получением плавленого шлака.

В качестве основного топлива рассматриваются ТКО со следующим элементным составом рабочей массы (%): 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. Низшая теплота сгорания ТКО составляет $Q_н^p$ = 5,85 МДж/кг.

Для поддержания температурного режима плавки (t = 1600 °C) используется дополнительное топливо — природный газ (CH_4 = 98,9 %, $Q_н^p$ = 35,59 МДж/м³).

Расчет выполнен нормативным методом [5]. Материальный баланс процессов горения составлялся для определения объемов воздуха и продуктов сгорания, на основе которых проводился расчет теплового баланса печи. Расчетная производительность комплекса принята на уровне 1,268 кг/с (что соответствует переработке ~40 тыс. тонн ТКО в год для города с населением 100 тыс. чел.).

Результаты и обсуждение

Анализ материального баланса показал, что для сжигания 1 кг ТКО при коэффициенте расхода воздуха α = 1,05 требуется 1,765 м³/кг воздуха, а объем продуктов сгорания составляет 2,447 м³/кг. При сжигании природного газа объем дымовых газов значительно выше и составляет 11,077 м³/м³. Суммарный объем отходящих газов из плавильной зоны при заданном расходе ТКО и газа составляет 8,72 м³/с.

Тепловой баланс печи Ванюкова (таблица 1) демонстрирует распределение энергетических потоков при температуре уходящих газов и шлака 1600 °C.

Таблица 1 — Сводный тепловой баланс плавильной печи

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

Примечание: Расход природного газа принят b = 0,507 м³/с.

Анализ энергетической эффективности

Как видно из таблицы 1, процесс плавки ТКО в печи Ванюкова не является автотермичным. Доля химической теплоты самих отходов в общем энергобалансе составляет лишь 29,06 %.

Основная нагрузка (70,63 %) ложится на природный газ. Это обусловлено необходимостью преодоления высоких энергозатрат на испарение влаги (W^p = 34,2 %), нагрев балластной золы (A^p = 31,7 %) и поддержание температуры шлака на уровне 1550–1600 °C для его перевода в вязкотекучее (плавленое) состояние.

Тем не менее, прямое сравнение энергозатрат с традиционными МСЗ некорректно, поскольку целевые продукты процессов различаются. Традиционный МСЗ производит только тепловую/электрическую энергию и дешевый некондиционный шлак. Комплекс на базе печи Ванюкова производит:

— Высокотемпературные дымовые газы (суммарная теплота ~22,95 МВт), которые далее утилизируются в котле-утилизаторе для генерации пара и электроэнергии.

— Плавленый шлак, который после охлаждения и помола с добавкой CaO (в соотношении ~1:1) становится полноценным портландцементным клинкером.

С экологической точки зрения, температура 1600 °C в шахте печи Ванюкова гарантирует время пребывания газов в высокотемпературной зоне, достаточное для 100 % разложения диоксинов, что решает главную проблему классического сжигания ТКО [2]. Минеральная часть отходов переходит в инертную стекловидную фазу, исключая выщелачивание тяжелых металлов в грунтовые воды при дальнейшем использовании цемента.

Экономическая эффективность комплекса достигается за счет замещения до 60–70 % природного известняка и глины в производстве цемента на бесплатный или даже требующий оплаты за приемку (экологический сбор) шлак от ТКО, а также за счет генерации электроэнергии из тепла уходящих газов.

Заключение

Проведен расчет теплового баланса плавильной печи Ванюкова при совместном сжигании ТКО и природного газа. Установлено, что для достижения температуры плавления шлака 1600 °C процесс требует подвода внешнего тепла: химическая теплота ТКО покрывает лишь 29 % потребности, остальное обеспечивается сжиганием природного газа (расход 0,507 м³/с на 1,268 кг/с ТКО).

Несмотря на неавтотермичность процесса плавки, технология является ресурсоэффективной, так как переводит минеральную часть ТКО в форму плавленого шлака, пригодного для производства цементного клинкера.

Высокие температуры в печи Ванюкова обеспечивают экологическую безопасность процесса за счет полной деструкции диоксинов и витрификации токсичных металлов.

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию соотношения ТКО/газ и расчет эффективности котла-утилизатора для максимизации выработки электроэнергии, что позволит снизить эксплуатационные затраты комплекса.

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.Данилович И.Ю., Сканави Н.А. Использование топливных шлаков и зол для производства

строительных материалов: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1988. 72 с.

5.Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова и др. М.: Энергия, 1973. 296 с.