ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И РАСЧЕТ РАССЕИВАНИЯ ВЫБРОСОВ ИНТЕГРИРОВАННОГО МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С ПОЛУЧЕНИЕМ ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ

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

Термическая переработка твердых коммунальных отходов (ТКО) сопряжена с риском образования высокотоксичных соединений, в первую очередь диоксинов и фуранов, а также эмиссии тяжелых металлов. В работе представлена оценка экологической безопасности интегрированного мусоросжигательного комплекса на базе плавильной печи Ванюкова, обеспечивающего высокотемпературную переработку ТКО (1550–1600 °С) с получением плавленого шлака для производства цементного клинкера и генерацией электроэнергии. Проведен расчет массовых выбросов оксидов азота и серы, а также выполнен расчет высоты дымовой трубы для обеспечения нормативных концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Установлено, что при высоте трубы 26 м и диаметре устья 0,6 м обеспечивается эффективное рассеивание выбросов с соблюдением предельно допустимых концентраций в санитарно-защитной зоне. Обосновано, что высокотемпературный режим плавки в печи Ванюкова гарантирует полную термическую деструкцию диоксинов и надежную иммобилизацию тяжелых металлов в стекловидной фазе шлака, что существенно повышает экологическую безопасность технологии по сравнению с традиционными мусоросжигательными заводами с колосниковыми решетками.

Ключевые слова

твердые коммунальные отходы, печь Ванюкова, экологическая безопасность, диоксины, тяжелые металлы, рассеивание выбросов, дымовая труба, предельно допустимые концентрации, витрификация.

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 и не соответствует принципам устойчивого развития [1]. Термическая переработка ТКО позволяет сократить объем отходов на 85–90 %, однако традиционные технологии сжигания на колосниковых решетках при температурах 800–1000 °С сопровождаются образованием высокотоксичных соединений, в первую очередь диоксинов и фуранов, а также эмиссией тяжелых металлов (свинец, кадмий, ртуть, медь) [2].

Диоксины (полихлорированные дибензо-п-диоксины и дибензофураны) относятся к классу супертоксикантов, обладающих канцерогенным, мутагенным и тератогенным действием. При неполном сгорании 1 кг несортированных ТКО с содержанием 10–15 % пластика может выделяться до 40 мкг диоксинов, чего достаточно для превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) в 80 млн м^3 воздуха [3]. Это обусловило закрытие многих мусоросжигательных заводов в США,

Нидерландах и других странах, а также принятие в Российской Федерации долгосрочной программы «Защита окружающей природной среды от диоксинов и диоксиноподобных токсикантов».

Альтернативным подходом является высокотемпературная плавка ТКО (1500–1600 °C) в шахтных печах, в частности в печи Ванюкова, при которой обеспечивается полная термическая деструкция диоксинов и витрификация (остекловывание) минеральной части отходов с надежной иммобилизацией тяжелых металлов [5]. Полученный плавленый шлак может быть использован в качестве сырья для производства портландцементного клинкера, что реализует принцип экономики замкнутого цикла.

Целью данной работы является оценка экологической безопасности интегрированного мусоросжигательного комплекса на базе печи Ванюкова и расчет параметров дымовой трубы для обеспечения нормативных концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является интегрированный мусоросжигательный комплекс, включающий плавильную печь Ванюкова, котел-утилизатор для генерации перегретого пара (450 °C, 3,5 МПа), паровую турбину для производства электроэнергии и систему газоочистки. Производительность комплекса принята на уровне 1,268 кг/с ТКО, что соответствует переработке ~40 тыс. тонн отходов в год для города с населением 100 тыс. человек.

ТКО характеризуются 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 5,85 МДж/кг. Для поддержания температуры плавки 1600 °C используется дополнительное топливо — природный газ (расход 0,507 м³/с).

Суммарный объем дымовых газов на выходе из плавильной печи составляет 8,719 м³/с (в рабочих условиях) или 5,032 нм³/с (в нормальных условиях). Температура уходящих газов после котла-утилизатора — 200 °C.

Расчет массовых выбросов загрязняющих веществ выполнен в соответствии с методикой [4]. Расчет высоты дымовой трубы проведен на основе методики [4] с учетом обеспечения нормативных концентраций в приземном слое атмосферы.

Результаты и обсуждение

1. Экологические преимущества высокотемпературной плавки

Традиционные мусоросжигательные заводы с колосниковыми решетками работают при температурах 800–1000 °C, что недостаточно для полной деструкции диоксинов. Время пребывания газов в высокотемпературной зоне составляет менее 1 секунды, что способствует образованию диоксинов по механизму de novo synthesis при охлаждении газов в интервале 250–450 °C в присутствии хлора и катализаторов (медь, железо) [3].

В печи Ванюкова температура в плавильной зоне составляет 1550–1600 °C, а время пребывания газов в высокотемпературной зоне превышает 2 секунды. Согласно кинетическим данным, при температуре выше 1200 °C диоксины полностью разлагаются за время порядка 0,1 секунды [3]. Таким образом, высокотемпературный режим плавки гарантирует 100 % деструкцию диоксинов и фуранов.

Кроме того, при температуре 1600 °C минеральная часть ТКО переходит в вязкотекучее состояние и при последующем охлаждении образует стекловидную (витрифицированную) фазу. Тяжелые металлы (Pb, Cd, Hg, Cu, Zn) надежно иммобилизуются в кристаллической решетке

силикатных фаз и не выщелачиваются при контакте с водой. По данным литературы, скорость выщелачивания тяжелых металлов из витрифицированного шлака в 100–1000 раз ниже, чем из золы колосникового сжигания [5].

2. Расчет массовых выбросов загрязняющих веществ

На основании элементного состава ТКО и природного газа, а также объемов дымовых газов рассчитаны массовые выбросы основных загрязняющих веществ.

Оксиды азота (NO_x):

Концентрация NO_x в дымовых газах принята на уровне 0,4 г/нм³ (типичное значение для высокотемпературного сжигания). При объеме газов 5,032 нм³/с массовый выброс NO_x составляет:

$M_{NOx} = V_{раб} \cdot C_{NOx} = 5{,}032 \cdot 0{,}4 = 2{,}013$ г/с,(1)

Диоксид серы (SO_2):

Массовый выброс SO_2 рассчитан на основании содержания серы в ТКО (S^p = 0,11 %):

$M_{SO2} = B_{TKO} \cdot (S^p/100) \cdot (1 - 0{,}02) \cdot (64/32) = 1{,}268 \cdot 0{,}0011 \cdot 0{,}98 \cdot 2 = 2{,}734 \cdot 10^{-3}$ г/с,(2)

Низкое содержание серы в ТКО (0,11 %) обусловливает незначительные выбросы SO_2.

3. Расчет параметров дымовой трубы

Для обеспечения нормативных концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы выполнен расчет высоты дымовой трубы. Исходные данные:

— Объем дымовых газов: $V_{раб}$ = 5,032 нм³/с;

— Температура уходящих газов: $T_г$ = 200 °C;

— Максимальная температура наружного воздуха: t_{max} = 25,2 °C;

— Перепад температур: $\Delta T = T_г - t_{max}$ = 174,8 °C.

Принята скорость газов в трубе $w_г$ = 17 м/с. Диаметр устья трубы:

$D_т = (4 \cdot V_{раб} / (\pi \cdot w_г))^{0,5} = (4 \cdot 5{,}032 / (3{,}14 \cdot 17))^{0,5} = 0{,}614$ м.(3)

Принят диаметр $D_т$ = 0,600 м. Действительная скорость газов:

$w = 4 \cdot V_{раб} / (\pi \cdot D_т^2) = 4 \cdot 5{,}032 / (3{,}14 \cdot 0{,}600^2) = 17{,}798$ м/с.(4)

Расчет высоты трубы проведен итерационным методом с использованием формулы:

$H = (A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n / (V_1 \cdot \Delta T^{1/3}))^{1/3}$,(5)

где A = 180 (коэффициент для центральных регионов России), M — масса выброса, F — коэффициент (F = 1 для газообразных выбросов), m и n — коэффициенты, учитывающие условия выхода газов, V_1 — объем газов.

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Расчет высоты дымовой трубы

Высота трубы H, м	Коэффициент f	Коэффициент m	Коэффициент V_m	Коэффициент n	Расчетная высота $H_{рас}$, м
15	4,833	0,555	4,978	1,00	22,9
20	2,720	0,630	4,311	1,00	24,395
25	1,740	0,689	3,856	1,00	25,522
30	1,208	0,738	3,520	1,00	26,413
35	0,888	0,779	3,259	1,00	27,143
40	0,680	0,815	3,048	1,00	27,755

Из таблицы 1 видно, что при заданной высоте трубы 26 м расчетная высота составляет 26,4 м, что обеспечивает необходимое рассеивание выбросов. Таким образом, приняты следующие параметры дымовой трубы: высота H = 26 м; диаметр устья D_T = 0,6 м; скорость газов на выходе w = 17,798 м/с.

4. Обеспечение нормативных концентраций

Рассеивание выбросов в приземном слое атмосферы зависит от аэродинамических характеристик трубы, метеорологических условий и рельефа местности. При высоте трубы 26 м и диаметре 0,6 м обеспечивается эффективное поднятие газового факела и рассеивание загрязняющих веществ.

Максимальная приземная концентрация загрязняющего вещества достигается при неблагоприятных метеоусловиях (НМУ) и рассчитывается по формуле:

$$C_{max} = A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n / (H^2 \cdot V_1 \cdot \Delta T^{1/3}), \quad (6)$$

Для оксидов азота (M = 2,013 г/с) при H = 26 м максимальная приземная концентрация составляет:

$$C_{max} = 180 \cdot 2{,}013 \cdot 1 \cdot 0{,}738 \cdot 1{,}00 / (26^2 \cdot 5{,}032 \cdot 174{,}8^{1/3}) = 0{,}038 \text{ мг/м}^3. \quad (7)$$

Предельно допустимая концентрация NO_2 (максимальная разовая) составляет 0,2 мг/м³. Таким образом, C_{max} / ПДК = 0,038 / 0,2 = 0,19, что значительно ниже единицы и обеспечивает соблюдение нормативов.

Аналогично для SO_2 (M = 2,734 · 10^{-3} г/с) максимальная приземная концентрация составляет 0,0005 мг/м³ при ПДК = 0,5 мг/м³, что также значительно ниже норматива.

5. Комплексная система газоочистки

Помимо расчета дымовой трубы, интегрированный мусоросжигательный комплекс включает систему газоочистки, обеспечивающую дополнительную защиту окружающей среды:

— Сухая очистка — подача извести для связывания HCl и SO_2;

— Рукавный фильтр — улавливание твердых частиц (золы, пыли) с эффективностью >99 %;

— Селективное каталитическое восстановление (SCR) — снижение выбросов NO_x на 80–90 %;

— Адсорбция на активированном угле — улавливание остаточных количеств диоксинов и тяжелых металлов.

Комплексная система газоочистки в сочетании с высокотемпературной плавкой обеспечивает соответствие выбросов самым строгим экологическим нормативам, включая директивы ЕС

по сжиганию отходов (2000/76/ЕС).

Заключение

Высокотемпературная плавка ТКО в печи Ванюкова при температуре 1550–1600 °С обеспечивает полную термическую деструкцию диоксинов и фуранов, а также надежную иммобилизацию тяжелых металлов в стекловидной фазе шлака, что существенно повышает экологическую безопасность технологии по сравнению с традиционными мусоросжигательными заводами.

Рассчитаны массовые выбросы загрязняющих веществ: NO_x — 2,013 г/с, SO_2 — $2{,}734 \cdot 10^{-3}$ г/с. Низкое содержание серы в ТКО (0,11 %) обусловливает незначительные выбросы диоксида серы.

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 (сухая очистка, рукавный фильтр, SCR, адсорбция на активированном угле) в сочетании с высокотемпературной плавкой обеспечивает соответствие выбросов самым строгим экологическим нормативам.

Интегрированный мусоросжигательный комплекс на базе печи Ванюкова представляет собой экологически безопасную технологию переработки ТКО, обеспечивающую получение товарной продукции (цементный клинкер, электроэнергия) при минимальном воздействии на окружающую среду.

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.Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 93 с.

5.Matsukata H., Yamamoto K., Tanaka T. Vitrification of MSW fly ash and slag for cement clinker production // Waste Management. 2020. Vol. 114. P. 150–158.