

УДК 66.04

О. П. КРОТ^{1*}, А. И. РОВЕНСКИЙ^{2*}, В. В. КОНЕВ^{3*}

^{1*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 700 30 08, эл. почта uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2376-4981

^{2*}Отдел региональной экологии, Северо-восточный научный центр НАН и МОН Украины, ул. Багалия, 8, Харьков, Украина, 61000, тел. +38 (057) 706 30 42, эл. почта uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0003-3803-2051

^{3*}Каф. «Строительные материалы, конструкции и сооружения», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61000, тел. +38 (067) 575 05 51, эл. почта ukrainoslav@ukr.net, ORCID 0000-0003-4215-5353

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Цель. Система управления твердыми отходами в Украине в основном сводится к захоронению их на полигонах. При этом отсутствует контроль над загрязнением окружающей среды, что в свою очередь приводит к экологическим рискам. На предприятиях железнодорожного транспорта образуется значительное количество твердых отходов. Поэтому основной целью работы должно стать решение проблемы ликвидации отходов, образовавшихся на крупных железнодорожных станциях и в процессе обслуживания поездов. **Методика.** Предлагается использовать мобильные подвижные мусороперерабатывающие установки, которые устраняют негативное влияние процесса накопления твердых промышленных и потребительских отходов на среду обитания человека. Эти установки могут обслуживать определенное количество производителей отходов. Данное исследование было проведено на мобильном мусороперерабатывающем комплексе МПК-300, расположенном на железнодорожном вокзале Харьков–Пассажирский Южной железной дороги. **Результаты.** Описана конструкция и назначение основных узлов мусороперерабатывающего комплекса. Зольный остаток после термического сжигания твердых отходов составляет 5–10 % от их первоначального объема и соответствует безопасному IV классу классификационного каталога отходов. Многоступенчатая термокаталитическая очистка отходящих газов обеспечивает концентрацию вредных веществ, в том числе диоксиновой группы, в пределах допустимых норм. Для полного сжигания всех компонентов отходов была определена температура в печи 850–900 °С, пребывание дымовых газов в камере дожигания при 1100–1200 °С – не менее двух секунд, коэффициент избытка воздуха – 1,4. **Научная новизна.** Авторами впервые было проведено исследование параметров сжигания отходов железнодорожного транспорта различного элементного состава. Рассчитан суммарный теоретический объем продуктов сгорания на мобильном мусороперерабатывающем комплексе. **Практическая значимость.** Применение мобильного мусороперерабатывающего комплекса позволяет решить проблему утилизации твердых бытовых отходов. Как показала практика, его эксплуатация обоснована и является не только экономически выгодной, но и экологически безопасной. Результаты работы позволяют оценить количество отходящих газов при различных морфологических составах отходов железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы; мобильный мусороперерабатывающий комплекс; железнодорожный транспорт; отходящие газы; сжигание; материальный баланс

Введение

Комплекс организаций и предприятий железнодорожного транспорта предназначен для обеспечения потребностей общественного производства и населения страны в перевозках во внутреннем и международном сообщениях и предоставления других транспортных услуг всем потребителям без ограничений по признакам формы собственности и видов деятельности. Количе-

ство железнодорожных вокзалов на Украине составляет 106 единиц, а железнодорожных станций – 1447 единиц. Для функционирования этих объектов необходимо создание эффективной инфраструктуры управления отходами. Твердые бытовые отходы (ТБО), образующиеся на крупных железнодорожных станциях и при обслуживании пассажирских поездов, по всей стране составляют значительные объемы [1]. В научных исследованиях [9, 12] описывается процесс

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

накопления отходов на предприятиях железнодорожного транспорта по разным странам, приводится количественная оценка, анализ и система управления отходами. Автор [6] раскрывает долгосрочные перспективы эксплуатации небольших мусоросжигающих заводов. Анализ параметров сгорания смеси отходов пассажирских поездов и угля в трубчатой печи [10] доказывает возможность использования тепловых свойств отходов.

Существующая в Украине практика обращения с твердыми отходами основана преимущественно на захоронении на свалках или полигонах. Объем отходов с каждым годом увеличивается, а территориальные возможности для их утилизации и переработки уменьшаются. Для доставки отходов от мест их образования до пунктов утилизации необходимо все больше времени и средств.

Захоронение ТБО на полигонах требует регулярного открытия новых площадок, которые должны располагаться все дальше от центра города. Это приводит к дополнительным экономическим затратам, связанным с увеличением пробега мусоровозов, эмиссий в атмосферный воздух продуктов сгорания автомобильного топлива, дополнительной загрузкой и износом автодорог. В результате себестоимость традиционного захоронения становится достаточно высокой, особенно с учетом большой площади необходимых полигонов, выведенных из сельскохозяйственного оборота минимум на 100 лет, а также высокой стоимостью их обустройства. В настоящее время в Украине сортировка и использование отходов в качестве вторичного сырья составляет меньше 10 % от общего годового объема.

Сжигание отходов с рекуперацией тепловой энергии является альтернативой захоронению. В исследовании [5] проанализирован энергетический потенциал ТБО в городе Понта-Гросса, Парана, Бразилия. Для анализа были собраны образцы на муниципальном полигоне. Средняя валовая теплотворная способность составляет 19,8 МДж/кг по сравнению с отходами других городов мира. Оптимальный состав ТБО Сингапура из 42 % пластмассы, 41 % бумаги/картона, 7 % текстиля и 10 % садоводческих отходов имел низшую теплотворную способность 23,7 МДж/кг [13]. Это меньше, чем минеральное топливо, но выполняются требования к топливу, указанные в европейских стандартах.

Преимущества использования сжигания для обработки отходов – это сокращение объема отходов, возможность обрабатывать громоздкие отходы, одновременно уменьшая их объем в 10 раз и более. В процессе сжигания отходов устраняются опасные свойства горючих канцерогенов, патогенных организмов, токсичных органических соединений и биологически активных веществ. В зависимости от мощности мусоросжигающего завода, за счет производства тепловой и электрической энергии возможно обеспечение определенного количества потребителей теплом или электричеством. В работе [8] было проведено сравнение эффективности преобразования энергии для различных типов термических процессов – сжигание отходов с рекуперацией энергии, газификация отходов с извлечением энергии и пиролиз отходов с извлечением энергии. Исследовались ТБО с разным морфологическим составом. Было выяснено, что доминирующим типом термической обработки является сжигание, связанное с извлечением энергии в паровом цикле. В малогабаритных установках электрическая эффективность ограничена масштабным эффектом и остается на уровне около 20–24 %.

В работе [7] сформулированы критерии эффективности работы мусоросжигающей печи на примере вращающейся: длина участка, где достигается максимальная температура горения; длина участка с минимальной температурой перед разгрузкой шлака; температура шлака на выходе. Выбрана более эффективная конфигурация по всем критериям (со встречным движением отходов и газа).

Анализ экологического воздействия установок по сжиганию отходов в процессе их эксплуатации выполнялся в работах [3, 4]. Для этого были подробно изучены различные установки для сжигания, как недавно созданные, так и эксплуатируемые последнее десятилетие. Использование современных систем очистки выбросов доказывают свою эффективность для борьбы с загрязнением воздуха.

Цель

Основной целью работы является решение проблемы ликвидации отходов, образовавшихся на крупных железнодорожных станциях и в процессе обслуживания поездов. Также предполагается

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТІ

ется провести исследование продуктов сгорания ТБО, состоящих из бумажных и пластиковых компонентов, на мобильном мусороперерабатывающем комплексе. Отходы собирались на объектах железнодорожного транспорта.

Методика

Предлагается использовать мобильные подвижные мусороперерабатывающие установки, которые устраняют негативное влияние процесса накопления твердых промышленных и потребительских отходов на среду обитания человека. Исследование было проведено на одной из таких установок, эксплуатируемых на Южной железной дороге.

Для проведения исследования было собрано несколько компонентов отходов, условно разделенных на две основные группы: бумага и пластик. К первой группе относятся отходы, в состав которых входит древесина, картон, бумага, опавшие листья (сезонно) и т. под. Вторая группа содержит отходы, состоящие из пластика в виде обрывков полиэтиленовой пленки, одноразовой посуды и т. д. Муниципальные отходы очень сложны и трудны в освоении из-за неоднородности их состава, могут содержать десятки различных веществ. На состав отходов влияет несколько факторов, а именно: время года, климат, образ жизни населения, демографический показатель и действующее законодательство. Независимо от места образования и разнообразия компонентов, ТБО состоят из таких частей: органиче-

ской, неорганической и физической (воды). Влажность отходов, в зависимости от условий образования, сбора и хранения, может изменяться от 5 до 60 %. Органическая часть отходов – это альтернативное топливо, которое состоит на 31–52 % из углерода, 16–40 % – из кислорода и других соединений.

Зная морфологический состав отходов, можно рассчитать их теплотворную способность, расход воздуха во время горения, количественный и качественный состав отходящих газов и адиабатическую температуру горения.

Результаты

На железнодорожном вокзале Харьков–Пассажирский введен в эксплуатацию мобильный мусороперерабатывающий комплекс МПК-300 для переработки отходов прибывающих на вокзал поездов и подразделений вокзала. После ввода этого комплекса в эксплуатацию службы вокзала отказались от накопления и вывоза поступающих отходов на полигон. Как показала практика, такие мероприятия оказались целиком обоснованными и являются не только экономически выгодными, но и экологически безопасными. На рис. 1 представлен общий вид комплекса МПК-300 производительностью 300 кг/час, размещенного на железнодорожной платформе. Он предназначен для приема, сортировки и термokatалитического сжигания твердых и жидких отходов.

Комплекс состоит из отделения сортировки с отбором коммерческой части ТБО.

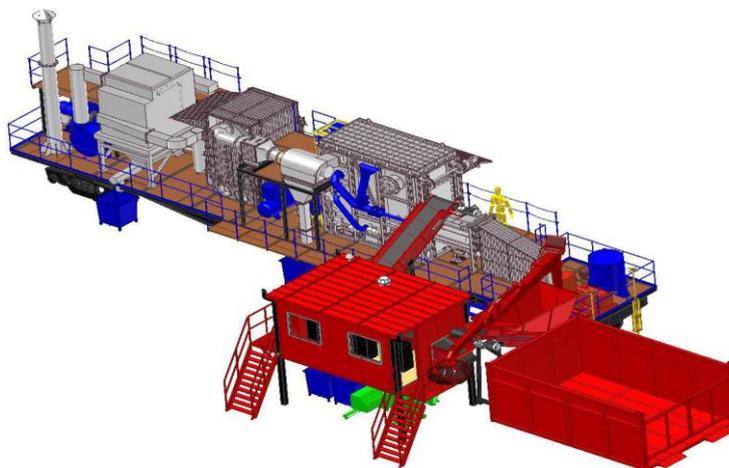


Рис. 1. Общий вид мобильного мусороперерабатывающего комплекса МПК-300

Fig. 1. General view of mobile waste-processing complex WPC-300

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Приемно-сортировочная линия предназначена для приема ТБО, дозированной подачи на сортировку, отбора стекла, металла и подачи остатков ТБО на термическое уничтожение. Отделение термохимического обезвреживания отходов состоит из многоступенчатой системы газоочистки, которая позволяет снизить концентрации вредных веществ до нормативов, действующих в странах Европейского Союза и Украины.

Технология термохимического обезвреживания ТБО, реализованная в составе комплекса, включает ряд последовательных операций:

- бездымная загрузка ТБО в топочную камеру печи;
- сжигание ТБО в рабочем пространстве печи и термическое окисление продуктов сгорания;
- дожигание тяжелых углеводородов и оксида углерода происходит в камере дожигания;
- обезвреживание высокотоксичных органических веществ продуктов сгорания, включая бензпирен, диоксины, фураны и др., происходит в двух последовательно установленных каталитических реакторах;

– предочистка дымовых газов в центробежно-вихревом пылеуловителе;

– очистка продуктов сгорания от кислых неорганических соединений в отводимых газах производится за счет подачи в газоотводящий тракт 10-процентного щелочного раствора;

– осаждение в тканевом фильтре механических загрязнений, включая соединения тяжелых металлов и остаточное количество сажи;

– улавливание соединений тяжелых металлов осуществляется путем адсорбирования их в углетканевом фильтре;

– транспортировка дымовых газов по газоотводящему тракту выполняется дымососной установкой.

Комплексы такого типа обеспечивают соблюдение экологических нормативов при максимальном использовании сырьевой и энергетической ценности ТБО с минимальными приведенными затратами, сокращают расходы на утилизацию, нагрузку на полигоны на 90 % и снижают опасность отходов до IV класса опасности [11]. Технические характеристики комплекса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики установки по сжиганию отходов предприятий железнодорожного транспорта

Table 1

Technical characteristics of the waste incineration plant of railway transport enterprises

Наименование показателя	Значение
Производительность комплекса, кг/час	300
Количество отбираемого вторсырья, кг/час	100
в том числе:	
– пластик и ПЭТ-тара;	25
– стекло;	20
– бумага, картон;	45
– черный и цветной металл.	10
Количество отходов, подаваемых на термокаталитическое обезвреживание, кг/час	200
Общая установленная мощность электроприводов комплекса, кВт	90
Объем дымовых газов, сбрасываемых в атмосферу, м ³ /час, не более	5000
Концентрация пыли в дымовых газах на выходе, мг/м ³ , не более	100
Концентрация загрязняющих веществ в приземном слое, рабочей площадке, доли ПДК, не более	0,1

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ТБО сжигаются в камерной печи представленной установки. Печь футерована и оборудована эжекционной форсункой и подводом горячих дутьевых газов в подколосниковое пространство и на форсунку. Температура в камере сжигания поддерживается в пределах 850–1000 °С. Загрузочное устройство периодически подает ТБО на колосниковую решетку, под которую для обеспечения горения подводится горячий воздух из рекуператора. После достижения рабочей температуры в печи (около 900 °С), что обеспечивает сжигание органических соединений, подача топлива в горелку прекращается, и процесс сжигания осуществляется только за счет тепла горения ТБО. Выходящие из печи газы после камеры дожига проходят сквозь рекуператор и подогревают в нем воздух для горения, который нагнетается в печь вентилятором.

Весомой характеристикой отходов является их теплотворная способность. ТБО можно отнести к низкокалорийному топливу. Если рассматривать отдельные составляющие отходов, то теплота сгорания пластмассы может составлять 43,7 МДж/кг. Тепловая ценность отходов прямо пропорциональна содержанию углерода в отходах и обратно пропорциональна зольности и содержанию влаги. Теплотворную способность отходов традиционно рассчитывают по эмпирической формуле Менделеева:

$$Q_p^H = 4,18 \cdot (81C_p + 300H_p - 26(O_p - S_p) - 6(9H_p + W_p)), \quad (1)$$

где Q_p^H – низшая теплота сгорания ТБО на рабочую массу, кДж/кг; C_p – общее содержание углерода, мас. %; H_p – общее содержание водорода, мас. %; O_p – общее содержание кислорода, мас. %; S_p – общее содержание серы, мас. %; W_p – общая влажность, мас. %.

Высшая теплота сгорания ТБО может быть рассчитана по формуле:

$$Q_p^B = Q_p^H + 25(9H_p + W_p). \quad (2)$$

В процессе сжигания отходов мобильный мусороперерабатывающий комплекс выделяет тепло, которое используется для подсушивания ТБО с высокой влажностью. Например, при подсушивании бумажной составляющей отходов с 60 до 25 % низшая теплота сгорания этих

компонентов повышается с 6 476,832 кДж/кг до 12 426,48 кДж/кг. Система подсушки позволяет повысить теплоту сгорания топлива и уменьшить подачу дополнительного топлива на поддержание горения.

Элементный состав ТБО определяется, исходя из его морфологического состава, по формулам:

$$C_{p_{sum}} = C_{p_1} \cdot I_1 + C_{p_2} \cdot I_2 + \dots + C_{p_{pn}} \cdot I_{pn}; \quad (3)$$

$$H_{p_{sum}} = H_{p_1} \cdot I_1 + H_{p_2} \cdot I_2 + \dots + H_{p_{pn}} \cdot I_{pn}; \quad (4)$$

$$O_{p_{sum}} = O_{p_1} \cdot I_1 + O_{p_2} \cdot I_2 + \dots + O_{p_{pn}} \cdot I_{pn}; \quad (5)$$

$$N_{p_{sum}} = N_{p_1} \cdot I_1 + N_{p_2} \cdot I_2 + \dots + N_{p_{pn}} \cdot I_{pn}; \quad (6)$$

$$S_{p_{sum}} = S_{p_1} \cdot I_1 + S_{p_2} \cdot I_2 + \dots + S_{p_{pn}} \cdot I_{pn}, \quad (7)$$

где $C_{p_1}, C_{p_2}, \dots, C_{p_n}$ – содержание углерода в каждом компоненте ТБО, % (аналогично и по другим элементам); $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ – доли соответствующих компонентов в общей массе ТБО, сумма которых равна 1; p – указатель рабочей массы ТБО; n – порядковый номер компонента [2].

Содержание влаги в рабочей массе каждого компонента отхода определяется по формуле:

$$W_{p_{sum}} = W_{p_1} \cdot I_1 + W_{p_2} \cdot I_2 + \dots + W_{p_{pn}} \cdot I_{pn}. \quad (8)$$

Содержание золы в рабочей массе каждого компонента отхода можно определить по формуле:

$$A_{p_{sum}} = A_{p_1} \cdot I_1 + A_{p_2} \cdot I_2 + \dots + A_{p_{pn}} \cdot I_{pn}, \quad (9)$$

где A_p – содержание золы, %.

Необходимо отметить, влага снижает качество топлива, а именно уменьшает теплоту его сгорания и затрудняет воспламенение. Зола также снижает качество топлива и препятствует полному его сгоранию, образуя на поверхности несгоревших частей отходов воздухонепроницаемый слой.

Различают теоретическую (калориметрическую) и практическую (действительную) температуры горения отходов. Калориметрическая температура – это температура, которую приобретают продукты сгорания при условии, что вся теплота, выделенная при полном сгора-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

нии единицы топлива, пошла на нагрев только продуктов сгорания. Ее определяют из уравне-

ния теплового баланса, в нашем случае она равна, °С:

$$t_{kal} = \frac{Q_H^p + I_T + I_{возд}}{V_{RO_2}^o \cdot c_{RO_2} + V_{N_2}^o \cdot c_{N_2} + V_{H_2O}^o \cdot c_{H_2O} + (\alpha - 1)V_{возд}^o \cdot c_{возд}}, \quad (10)$$

где Q_H^p – низшая теплота сгорания рабочей массы отходов; c_{RO_2} , c_{N_2} , c_{H_2O} , $c_{возд}$ – удельные теплоемкости продуктов сгорания, соответственно двухатомных газов, азота, воды и воздуха, кДж/(кг·К); I_T – энтальпия топлива, кДж/кг, рассчитывается по формуле: $I_T = c_T \cdot t_T$; $I_{возд}$ – энтальпия воздуха, кДж/кг, рассчитывается по формуле: $I_{возд} = V_{возд}^o \cdot \alpha \cdot c_{возд} \cdot t_{возд}$.

Действительная температура сгорания, °С:

$$t_d = t_{kal} \left(1 - \frac{q_{ном.вОС}}{100}\right) (1 - \sigma), \quad (11)$$

где $q_{ном.вОС}$ – коэффициент, учитывающий потери в окружающую среду, %; σ – коэффициент, который учитывает прямую отдачу (коэффициент долевого излучения газов), равен 0,15.

Количество теоретически необходимого воздуха для полного сгорания 1 кг отходов рассчитывалось по формуле:

$$V_{возд}^o = 0,088Cp_{sum} + 0,265Hp_{sum} + 0,033Sp_{sum} - 0,033Op_{sum}. \quad (12)$$

Теоретический объем азота рассчитывался по формуле, м³/кг:

$$V_{N_2}^o = 0,79V_{возд}^o, \quad (13)$$

Теоретический объем трехатомных газов, м³/кг:

$$V_{RO_2}^o = 1,866Cp_{sum} / 100, \quad (14)$$

Теоретический объем водяного пара, м³/кг:

$$V_{H_2O}^o = 0,111Hp_{sum} + 0,0124Ap_{sum} + 0,0161V_{возд}^o. \quad (15)$$

Суммарный теоретический объем продуктов сгорания, м³/кг:

$$V_{газов}^o = V_{N_2}^o + V_{RO_2}^o + V_{H_2O}^o. \quad (16)$$

Полученные результаты расчета теоретического объема продуктов сгорания приведены в табл. 2. Проведенные исследования показывают, что ТБО пассажирских поездов и вокзала в основном состоят из бумаги и пластика, доля содержания серы в этих отходах меньше 0,01. Элементный состав первой группы отходов, содержащих древесину, картон, бумагу, опавшие листья (сезонно): 44 % углерода, 6,2 % водорода, 49,4 % кислорода.

Таблица 2

Результаты расчета теоретического объема продуктов сгорания

Table 2

The results of calculating the theoretical volume of combustion products

Теоретические объемы, м ³ /кг	Соотношение долей картона и пластика		
	0,5/0,5	0,6/0,4	0,7/0,3
V° воздуха	6,65	5,81	4,96
V° RO ₂	1,01	0,91	0,80
V° H ₂ O	1,334	1,26	1,18
V° азота	5,26	4,59	3,92
V° газов	7,60	6,75	5,91

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Q_p^H складає 16 572,82 кДж/кг при нульовій вологості.

Елементний склад другої групи відходів із пластику в формі обривків поліетиленової плівки, одноразової посуду та інших полімерів – це 84 % вуглецю, 14 % водню та 2 % кисню.

Q_p^H складає 43932 кДж/кг при нульовій вологості.

Таким чином, система використання теплової енергії димових газів, що утворюються після згорання відходів для підсушування перед подачею в печі, має велике значення для економії додаткового палива.

Научная новизна и практическая значимость

Авторами вперше було проведено дослідження параметрів згорання відходів залізничного транспорту різного складу. Розраховано сумарний теоретичний об'єм продуктів згорання на мобільному мусоропереробному комплексі. Як показала прак-

тика, його експлуатація обґрунтована та є не тільки економічно вигідною, а й екологічно безпечною. Результати роботи дозволяють оцінити кількість відходів газів при різних морфологічних складів відходів залізничного транспорту.

Выводы

Згорання муніципальних відходів повинно відповідати наступним критеріям:

1. Температура згорання в газовій фазі – не менше 850 °С. Час перебування димових газів в зоні згорання не менше двох секунд.

2. Коефіцієнт надлишку повітря – 1,4, що забезпечить мінімізацію корозії та повне згорання. Вміст вуглецю в димових газах є ключовим показником якості згорання.

3. Димові гази, що утворюються в мусоропалачах, повинні оброблятися за допомогою високоєфективної системи очищення димових газів.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Безовська, М. С. Управління поведінки з відходами вагонних пасажирських депо на Придніпровській залізниці / М. С. Безовська, В. М. Плахотник, А. Х. Дабкіна // Вісник Кременч. держ. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2007. – Вип. 1 (42), ч. 1. – С. 115–118.
2. Крот, О. П. Моделювання установок з обертовою печю для термічного обезвреження відходів / О. П. Крот, А. І. Ровенський // Проблеми регіональної енергетики. – 2018. – № 1 (36). – С. 44–57. doi: 10.5281/zenodo.1217255
3. Твердые бытовые отходы (сбор, транспорт и обезвреживание) : справочник / В. Г. Систер, А. Н. Мирный, Л. С. Скворцов, Н. Ф. Абрамов, Х. Н. Никогосов. – Москва : АКХ им. К. Д. Панфилова, 2001. – 319 с.
4. Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value / L. Zhao, A. Giannis, W.-Y. Lam, S.-X. Lin, K. Yin, G.-A. Yuan, J.-Y. Wang // Sustainable Environment Research. – 2016. – Vol. 26. – Iss. 1. – P. 51–54. doi: 10.1016/j.serj.2015.09.003
5. Combustion characteristics of coal and refuse from passenger trains / Ren Fu-min, Yue Feng, Gao Ming, Yu Min // Waste Management. – 2010. – Vol. 30. – Iss. 7. – P. 1196–1205. doi: 10.1016/j.wasman.2009.12.023
6. Decentralized Waste Management in Indian Railways: A Preliminary Analysis / M. Sharma, R. Kumar Sugam, K. Neog, A. Ramji. – New Delhi : Council on Energy, Environment and Water, 2016. – 26 p.
7. Kong, W. M. Implementation of Incineration for Efficient Waste Reduction / W. M. Kong // 2015 International Conference on Advances in Environment Research. – 2015. – Vol. 87. – P. 77–80.
8. Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration / A. Damgaard, C. Riber, T. Fruergaard, T. Hulgaard, T. H. Christensen // Waste Management. – 2010. – Vol. 30. – Iss. 7. – P. 1244–1250. doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.025
9. Lombardi, L. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste / L. Lombardi, E. Carnevale, A. Corti // Waste Management. – 2015. – Vol. 37. – P. 26–44. doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.010

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

10. Mobile thermocatalytic waste processing complex / L. L. Tovazhnyanskyu, V. E. Ved, V. A. Koshchii, A. I. Rovenskii, E. V. Krasnokutskii // Chemical Engineering Transaction. – 2013. – Vol. 35, pt. 2. – P. 907–912.
11. Nguyen, Th. H. A. Management of organic solid waste from rail operation by the Vietnam railways: the current situation and possible solutions / Thi Hoai An Nguyen // Journal of Vietnamese Environment. – 2012. – Vol. 3, No. 1. – P. 34–37.
12. Potencial energético de resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil (Energy potential of household solid waste (HSW) in the city of Ponta Grossa, Paraná, Brazil) / S. Gomes, P. H. W. Neto, D. Agostinho da Silva, S. R. Masetto Antunes, C. Hugo Rocha // Engenharia Sanitaria e Ambiental. – 2017. – Vol. 22. – Iss. 6. – P. 1197–1202. doi: 10.1590/S1413-41522017143432
13. Termovalorizzatori: analisi e confronto tra nuove tecnologie, impatti e strategie di mitigazione (Thermovalorization: new technologies, impacts and mitigation strategies) / M. Buffoli, S. Capolongo, V. L. Loconte, C. Signorelli // Annali di igiene: medicina preventiva e di comunità. – 2012. – Vol. 24 (2). – P. 167–178.

О. П. КРОТ^{1*}, О. І. РОВЕНСЬКИЙ^{2*}, В. В. КОНЄВ^{3*}

^{1*}Каф. «Безпека життєдіяльності та інженерна екологія», Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 700 30 08, ел. пошта uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2376-4981

^{2*}Відділ регіональної екології, Північно-східний науковий центр Національної академії наук України, вул. Багалия, 8, Харків, Україна, 61000, тел. +38 (057) 706 30 42, ел. пошта uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0003-3803-2051

^{3*}Каф. «Будівельні матеріали, конструкції та споруди», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61000, тел. +38 (067) 575 05 51, ел. пошта ukrainoslav@ukr.net, ORCID 0000-0003-4215-5353

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ, ЩО УТВОРЮЮТЬСЯ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Мета. Система управління твердими відходами в Україні в основному зводиться до захоронення їх на полігоні. При цьому відсутній контроль за забрудненням навколишнього середовища, що в свою чергу призводить до екологічних ризиків. На підприємствах залізничного транспорту утворюється значна кількість твердих відходів. Тому основною метою роботи має стати вирішення проблеми ліквідації відходів, що утворилися на великих залізничних станціях та в процесі обслуговування поїздів. **Методика.** Пропонується використовувати мобільні рухливі сміттєпереробні установки, які усувають негативний вплив процесу накопичення твердих промислових і споживчих відходів на середовище проживання людини. Ці установки можуть обслуговувати певну кількість виробників відходів. Дане дослідження було проведено на мобільному сміттєпереробному комплексі МПК-300, розташованому на залізничному вокзалі Харків–Пасажирський Південної залізниці. **Результати.** Описана конструкція й призначення основних вузлів сміттєпереробного комплексу. Зольний залишок після термічного спалювання твердих відходів становить 5–10 % від їх початкового об'єму і відповідає безпечному IV класу класифікаційного каталогу відходів. Багатоступеневе термокаталітичне очищення газів, що відходять, забезпечує концентрацію шкідливих речовин, в тому числі діоксинової групи, в межах допустимих норм. Для повного спалювання всіх компонентів відходів була визначена температура в печі 850–900 °С, перебування димових газів у камері допалювання при 1100–1200 °С – не менше двох секунд, коефіцієнт надлишку повітря – 1,4. **Наукова новизна.** Авторами вперше було проведено дослідження параметрів спалювання відходів залізничного транспорту різного елементного складу. Розрахований сумарний теоретичний об'єм продуктів згоряння на мобільному сміттєпереробному комплексі. **Практична значимість.** Застосування мобільного сміттєпереробного комплексу дозволяє вирішити проблему утилізації твердих побутових відходів. Як показала практика, його експлуатація обґрунтована та є не тільки економічно вигідною, а й екологічно безпечною. Результати роботи дозволяють оцінити кількість газів, що відходять, при різних морфологічних складах відходів залізничного транспорту.

Ключові слова: тверді побутові відходи; мобільний сміттєпереробний комплекс; залізничний транспорт; відхідні гази; спалювання; матеріальний баланс

O. P. KROT^{1*}, O. I. ROVENSKIY^{2*}, V. V. KONIEV^{3*}

^{1*}Dep. «Safety Life and Environmental Engineering», Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Sumska St., 40, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 700 30 08, e-mail uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2376-4981

^{2*}Department of the Regional Ecology, North-East Scientific Centre of the National Academy of Sciences of Ukraine, Bahalii St., 8, Kharkiv, Ukraine, 61000, tel. +38 (057) 706 30 42, e-mail uch.opk@gmail.com, ORCID 0000-0003-3803-2051

^{3*}Dep. «Building Materials, Structures and Constructions», Ukrainian State University of Railway Transport, Feiervakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (067) 575 05 51, e-mail ukrainoslav@ukr.net, ORCID 0000-0003-4215-5353

THERMAL TREATMENT OF SOLID WASTE GENERATED BY RAILWAY TRANSPORT

Purpose. The solid waste management system in Ukraine consists from the land disposal of waste. In this case, there is no control over environmental pollution, which in turn leads to environmental risks. A considerable amount of solid waste is formed at the railway transport enterprises. The solution of the problem of the elimination of wastes generated at large railway stations and in the process of servicing trains, namely directly at the place of their formation, is considered in this work. **Methodology.** The authors propose to use mobile waste processing plants, which eliminate the negative impact of the process of accumulation of solid industrial and municipal waste on the human habitat; while they can serve a certain number of waste producers. The study was conducted on a waste processing plant (WPP-300) located in Kharkiv on the Southern Railway. **Findings.** The design and purpose of the main units of waste processing plant are described. The bottom ash after incineration of solid waste accounts for 5-10 % of the initial volume of waste and corresponds to the safe IVth class of the waste classification catalog. Multi-stage thermal catalytic cleaning of waste gases provides concentration of harmful substances, including dioxin group within the limits of permissible norms. For complete combustion of all components of the waste, the temperature in the furnace was 850-900 °C, the presence of flue gases in the afterburner at 1100-1200 °C for at least two seconds, the defined excess air 1.4. **Originality.** The authors for the first time conducted a study of the parameters of incineration of various elemental wastes. We calculated the total theoretical volume of combustion products on a mobile waste-processing complex. **Practical value.** The use of a mobile incineration plant allows solving the problem of solid domestic waste disposal. As shown by the practice of its operation, such measures are justified and are not only economically viable, but also environmentally friendly. The results of the work allow estimating the amount of waste gases at various morphological compositions of the waste of the railway transport.

Keywords: municipal solid waste; mobile waste recycling complex; railway transport; waste gases; incineration; material balance

REFERENCES

1. Bezovska, M. S., Plakhotnyk, V. M., & Drabkina, A. K. (2007). Upravlinnia povodzhennia z vidkhodamy vahonnykh pasazhyrskykh depo na Prydniprovskii zaliznytsi. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 1(42), 1, 115-118. (in Ukrainian)
2. Krot, O. P., & Rovenskiy, O. I. (2018). Modeling of Installations with a Rotary Kiln for Thermal Decontamination of Wastes. *Problemele energeticii regionale*, 1(36), 44-57. doi: 10.5281/zenodo.1217255 (in Russian)
3. Sister, V. G., Mirnyy, A. N., Skvortsov, L. S., Abramov, N. F., & Nikogosov, K. N. (2001). *Tverdyye bytovyye otkhody (sbor, transport i obezvrezhivaniye): Spravochnik*. Moscow: Akademiya kommunalnogo khozyaystva imeni K. D. Panfilova. (in Russian)
4. Zhao, L., Giannis, A., Lam, W.-Y., Lin, S.-X., Yin, K., Yuan, G.-A., & Wang, J.-Y. (2016). Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. *Sustainable Environment Research*, 1(26), 51-54. doi:10.1016/j.serj.2015.09.003 (in English)
5. Fu-min, R., Feng, Y., Ming, G., & Min, Y. (2010). Combustion characteristics of coal and refuse from passenger trains. *Waste Management*, 30(7), 1196-1205. doi: org/10.1016/j.wasman.2009.12.023 (in English)
6. Sharma, M., Neog, K., Sugam, R. K., & Ramji, A. (2016). Decentralised Waste Management in Indian Railways: A Preliminary Analysis. *Council on Energy, Environment and Water*, 26. Retrieved from <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/Decentralised%20Waste%20Management%20in%20India%20Railways.pdf> (in English)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

7. Kong, W. M. (2015). Implementation of Incineration for Efficient Waste Reduction. *International Conference on Advances in Environment Research*, 87, 77-80. (in English)
8. Damgaard, A., Riber, C., Fruerqaard, T., Hulqaard, T., & Christensen, T. H. (2010). Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration. *Waste Management*, 30(7), 1244-1250. doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.025 (in English)
9. Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*, 37, 26-44. doi: doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010 (in English)
10. Tovazhnyansky, L. L., Ved, V. E., Koshchii, V. A., Rovenskii, A. I., & Krasnokutskii, E. V. (2013). Mobile thermocatalytic waste processing complex. *Chemical Engineering Transaction*, 35(2), 907-912. (in English)
11. Nguyen, T. H. A. (2012). Management of organic solid waste from rail operation by the Vietnam railways: the current situation and possible solutions. *Journal of Vietnamese Environment*, 3(1), 34-37. (in English)
12. Gomes, S., Neto, P. H. W., Silva, D. A., Antunes, S. R. M., & Rocha, C. H. (2017) Potencial energético de resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil (Energy potential of household solid waste (HSW) in the city of Ponta Grossa, Paraná, Brazil). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(6), 1197-1202. doi:10.1590/S1413-41522017143432 (in Portugal)
13. Buffoli, M., Capolongo, S., Loconte, V. L., & Signorelli, C. (2012). Termovalorizzatori: analisi e confronto tra nuove tecnologie, impatti e strategie di mitigazione (Thermovalorization: new technologies, impacts and mitigation strategies). *Annali di igiene: medicina preventiva e di comunità*, 24(2), 167-178. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228111250_Thermovalorization_new_technologies_impacts_and_mitigation_strategies (in Italian)

Надійшла до редколегії: 04.04.2018

Прийнята до друку: 10.07.2018