

О СЖИГАТЕЛЯХ ТКО

Г. А. Кривоносов, старший научный сотрудник ООО «Фирма ГАК»

В статье рассматриваются физико-химические реакции окисления ТКО в сжигателях, показано преимущество подачи воздуха в топку сверху. Предложенная технология сжигания ТКО дает возможность использовать сжигатель без дорогостоящего плазменного устройства.

Морфологический и химический состав ТКО весьма разнообразен. Процесс механической сортировки с целью дальнейшей переработки хорошо отработан, и некоторые отклонения от типовой технологии не оказывают существенного негативного воздействия на окружающую среду. Другое дело – химическая или тепловая переработка ТКО: она далеко не всегда отвечает нормам безопасности для окружающей среды. Общие требования, которым должен соответствовать способ утилизации ТКО, заключаются в следующем: минимальном риске для окружающей среды, безопасности для человека и экономичность. Одним из наиболее эффективных способов ликвидации ТКО является их сжигание в специальных высокотемпературных сжигателях. Такие установки имеются в ограниченном количестве в развитых странах [1]. Этот способ прекрасно подходит даже для сжигания персистентных высокохлорированных пестицидов, таких как ДДТ и дильдрин (а такие химические соединения не так уж редки в составе ТКО) [2].

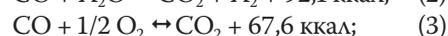
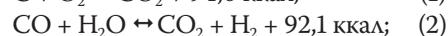
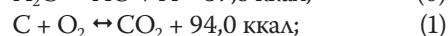
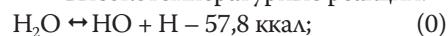
Сжигание является высокотемпературным термическим окислительным процессом, в результате которого химическое соединение разрушается до газов и несгораемых твердых частиц, таких как зола и шлак. Отходящие газы, в составе которых содержатся молекулы воды, диоксида углерода, осколки разных кислот, оксиды металлов, частицы высокотемпературных сплавов, подлежат очистке. Как следует из приведенных данных [3], температура полного сгорания ряда действующих веществ пестицидных формуляций находится в диапазоне от 545 до 879 °С. Были отмечены небольшие изменения в эффективности сжигания между температурами 600 и 1000 °С для ряда пес-

тицидов [3]. Например, для трифлуоралана эти величины составили 99,7 и 99,8 % соответственно. В то же время эффективность сжигания стойких хлорорганических пестицидов (ДДТ и дильдрин) при температуре 800 °С составила 99,5 %, тогда как этот же параметр для пестицидов, подверженных биоразложению, таких как атразин и карбарил, при температуре 1000 °С составил менее 90 %. К работе сжигателей опасных отходов предъявляются повышенные требования по температурному режиму, по минимальному градиенту температуры в камере сжигателя, по времени нахождения веществ утилизации в области высоких температур, по количеству кислородосодержащих молекул и воздуха, а также по уровням эмиссии загрязняющих веществ с отходящими газами, которые контролируются на государственном уровне. Агентство по охране окружающей среды (EPA) США рекомендует следующие оптимальные условия для разрушения органических пестицидов в сжигателях опасных отходов: температура камеры сжигания 1000 °С, время нахождения 2 с [4]. Соблюдение этих условий очень важно для уменьшения образования продуктов неполного сгорания, особенно пестицидов.

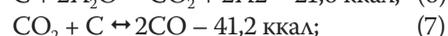
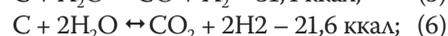
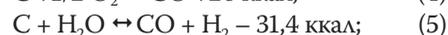
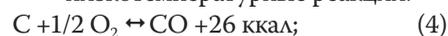
ТКО после механической сортировки состоит в основном из углеводородных соединений, и следует рассматривать химические реакции при высоких температурах. Рассмотрим интересные нас процессы: с выделением тепла – окисление углерода и горение смолистых веществ; с поглощением тепла – нагрев влаги (в ТКО ее содержится до 30–50 %) и смолистых соединений до температуры кипения и их испарение, а также процесс образования СО при прохождении СО₂ через углеродосодержащие вещества (разогретый углерод).

Опишем эти процессы в следующем виде [5]:

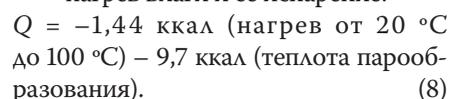
• высокотемпературные реакции:



• низкотемпературные реакции:



• нагрев влаги и ее испарение:



Количественные значения тепла приведены для 1 грамм-моля вещества.

Отметим, что реакции (1)–(4) и реакция окисления углеродсодержащих соединений, содержащихся в древесине или ее продуктах, проходят с выделением тепла, а реакции (0), (5)–(8) проходят с поглощением тепла. Тепло, выделяемое при сгорании смолистых компонентов, трудно поддается учету из-за отсутствия количественных данных о содержании смолистых веществ в твердом топливе и их теплотворной способности.

Во многих сжигателях для утилизации ТКО [5] процессы сжигания твердого топлива проходят, как правило, однотипно за исключением тех печей, где применяются плазменные горелки (к этим конструкциям, показанным на рис. 1, мы еще вернемся). Это обусловлено тем, что конструкции топок, подзольника и дымохода, а также расположение их друг относительно друга мало чем различаются. Во всех случаях холодный воздух из окружающей среды подается через подзольник в топку, при этом он нагревается от колосников в предколосниковой зоне.

Рассмотрим случай стационарного горения в топках несколько подробнее.

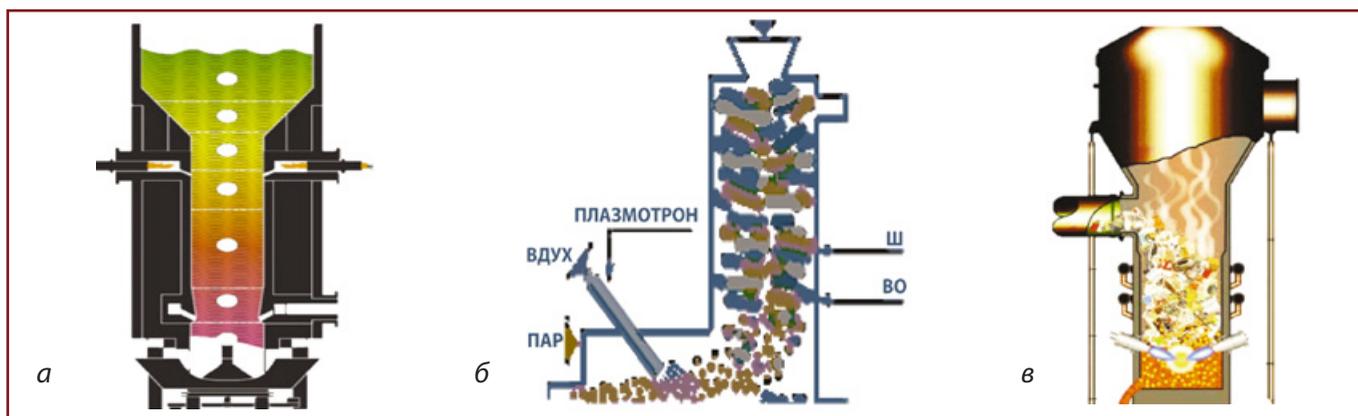


Рис. 1. Топки с плазменными горелками: а – с верхней подачей воздуха; б и в – с нижней подачей воздуха

На рис. 1, а приводится разрез топki сжигателей-аналогов, заполненной твердым топливом. Пространство топki поделено на четыре температурные зоны. Рассмотрим, как скорости реакций (0)–(8) зависят от теплового режима в топке. Отметим, что реакция разложения воды (0) протекает при высокой температуре ($t \approx +900$ °С) в колосниковой зоне. Оценим скорости протекания реакций в топке аналогов в последовательности движения воздуха снизу вверх. В колосниковой зоне, где температура высока, поступающий воздух нагревается и проходит в предколосниковую зону. Здесь с разными скоростями протекают реакции (1)–(4) с выделением тепла. Колосники под действием теплового излучения нагреваются и поддерживают тепловой режим, исполняя роль катализатора. Скорость реакции (1) существенно больше скорости реакции (4), максимум которой приходится на температурный интервал 450–500 °С. Реакции (0), (2) и (3) маловероятны из-за малого количества H_2O и концентрации CO . Итак, доминирующей реакцией в зоне I (рис. 2, а) является реакция (1).

По мере продвижения горячего воздуха по топке вверх состав его в зоне II изменился. Концентрация O_2 уменьшилась, скорость реакции (4) возросла, испарившаяся вода дополнительно добавит количество продуктов разложения H_2O , и это способствует росту скорости реакций (2), (5) и (6). Поясним: скорость реакций взаимодействия C и CO с HO максимальна при температуре 500–600 °С. Скорость реакции (7) в зонах II и III возросла и достигла максимума. В этих зонах смолистые соединения активно испаря-

ются с поглощением тепла, но не воспламеняются из-за малой концентрации O_2 и наличия паров воды. Таким образом, тепловой баланс в зоне II близок к нулевому значению.

В зоне III скорость реакции (3) и окислительно-восстановительные реакции смолистых компонентов малы (O_2 отсутствует), а скорости реакций (5)–(7) – максимальны. Пониженная температура (около 500 °С) и наличие смолистых соединений в топочном сырье способствуют образованию канцерогенных соединений, в частности бенз(а)пирена [1] и диоксида [6]. Из зоны III выходят окислы углерода, пары смолистых соединений и воды, компоненты и мелкие частицы углерода в виде сажи, а также азот и его соединения. В этой зоне тепловой баланс отрицательный.

В современных печах [2] топку на выходе дополняют камерами дожигания форсунками для впрыскивания кислорода в камеру или добавляют плазменные горелки (рис. 1). При таких конструктивных изменениях КПД топki несколько повышается. Однако не каждое дополнение в топке приводит к положительным результатам.

Вышеназванные недостатки топливных печей можно устранить небольшим конструктивным изменением – изменить направление подачи входного воздуха [9]. Для понимания преимущества данного предложения подробнее рассмотрим ход процессов горения в топке. На рис. 2, б приведена диаграмма протекания реакций окисления твердого топлива по предлагаемому способу (рассматривается установившийся процесс горения). Воздух, предварительно подогретый выходящими газами, пос-

тупает сверху в зону III топki. Топочное сырье в зонах III и II прогревается входным горячим воздухом и тепловым излучением из зоны I и от боковых стенок топki. Происходит испарение смолистых соединений и воды, а также образование канцерогенных соединений, угарного газа (реакция (4)) и ряд других процессов. В этих зонах нет условий для протекания высокотемпературных реакций – слишком низкая температура для разложения H_2O и протекания реакции (1). Воздух, обогащенный разными испарившимися компонентами, проходит в высокотемпературную зону I. Пары смолистых соединений воспламеняются, и создаются условия для протекания реакций (1)–(3). Реакции (4)–(7) при температурах выше 1000 °С имеют малую скорость [8]. Колосники разогреваются до высокой температуры, и канцерогенные образования, которые имели место в зонах III и II, проходя через них, разлагаются [1, 6]. Не прореагировавшие компоненты в зоне I, проходя около разогретой форсунки воздуха, расположенной под колосниками, догорают при встрече с добавочной порцией теплого воздуха, содержащей кислород.

Таким образом, всего лишь изменение направления подачи воздуха в топку принципиально меняет физико-химические процессы окисления и разложения топочного сырья (в частности, ТКО). Это достигается тем, что в топке не расходуется тепло на ненужные реакции (в частности, на низкотемпературные (реакции (5)–(7)), а разложение молекул воды (реакция 0) не происходит из-за отсутствия паров воды. Для протекания высокотемпературных реакций необходимо подде-

Выход продуктов горения форсунки $\circ \uparrow \circ \uparrow \circ \uparrow \circ \uparrow$		Воздух O_2, N_2
(5) (6) (7)	I I I –зона, $T \leq 500$ °C	$\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow$
(2) (3) (5) (6) (7) (8)		(4) (8)
(0) (1) (2) (3) (4)	I I I –зона, $T \approx 700$ °C	(4) (8)
$T \geq 1000$ °C	I –зона, $T \approx 1000$ °C	(0) (1) (2) (3)
(0)		$T \geq 1200$ °C
••••••••••	Предколосниковая зона	••••••••••
$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$		Форсунки $\circ \downarrow \circ \downarrow \circ \downarrow$
Воздух O_2, N_2	← Колосники →	Выход продуктов горения
a		б

Рис. 2. Диаграмма протекания реакций по зонам в топке: а – в топливной печи аналогов; б – в предлагаемом варианте (цифры в круглых скобках указывают номер типа реакций горения)

рживать в топке температуру от 1000 до 1200 °C. В современных мусоросжигающих печах такой режим поддерживается введением в топку плазменного пламени (рис. 1, а). Но не во всех такого рода устройствах (рис. 1, б, 1, в) корректно используется это дорогостоящее устройство.

Для поддержания высокотемпературного режима в сжигателях не обязательно иметь дорогостоящее плаз-

менное устройство. Достаточно увеличить объем топки, его тепло изолировать и осуществить подачу теплого воздуха сверху. Проект такого типа мусоросжигающего устройства представлен на рис. 3.

В качестве доказательства применимости предлагаемой технологии и ее эффективности приведено [9] описание ряда устройств, работающих на этом принципе. Отличительная особенность технологии позволяет в топке повысить теплотворную способность сжигания твердого топлива до 30 % относительно топочных устройств-аналогов, а температура внутри топки достигает 1200 °C. При такой температуре происходит разложение даже ДДТ [9], в связи с чем на основании полученных результатов была изготовлена экспериментальная печь по утилизации ДДТ.

Из средств массовой информации известно, что Правительством РФ закупается за границей несколько заводов по утилизации ТКО. Однако описанная технология термической утилизации ТКО позволяет обходиться без некоторых агрегатов, в частности не нужен плазменный генератор и питающие устройства к нему – наиболее дорогостоящие элементы технологического процесса (см. рис. 3).

Добавим, что в отработанных продуктах сжигания (по нашей технологии) не содержится окись углерода, а также

значительно меньше осколков высокомолекулярных углеводородных соединений (в частности представителей семейства полициклических углеводородов – сильнодействующих отравляющих соединений), а значит, упрощается и конструкция воздухоочистного оборудования. Все это означает снижение негативного воздействия на окружающую среду и одновременно экономию финансовых средств. ♻️

ЛИТЕРАТУРА

1. Schimpf W. A. // «Chemistry of Crop Protection». *Progress and Prospects in Science and Regulation*. Ed. . Издательство: Wiley ISBN: 3-527-30540-8, 2003, p. 406.

2. Felsot, A.S.; Racke, K.D.; Hamilton, D.J. // «Disposal and degradation of pesticide waste». *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2003, p 45.

3. Kennedy MV, Stojanovic BJ and Shuman FL //Jr (1972) «Analysis of decomposition products of pesticides». *J. Residue Rev.* 1969. V. 29. P. 89–104.

4. Ferguson T. L., Wilkinson R. R. // «Treatment and Disposal of Pesticide Wastes». *ACS Symp. Series 259*. American Chemical Society, Washington DC, 1984. P. 181–191.

5. Мельников Д. С., Кривоносов Г. А. // «Топливная печь «Натали». Патент Украины, № 200031211126, 08.12.2003; Кривоносов Г. А., Мельников Д. С., Шушляков Д. А. // «Печь на твердом топливе». Патент РФ, № 68098, 10.11.2007.; Мельников Д. С., Кривоносов Г. А., Шушляков Д. А. // «Печ на твердом паливи». Патент України, № 23254, 10.05.2007.

6. Jensen J. K. // «Pesticide Waste Management. Technology and Regulations». *ACS Symp. Ser. 510*. American Chemical Society, Washington, DC, 1992. P. 20–28.

7. Кривоносов Г. А. // «Новое поколение печей на твердом топливе», 15-я Конф. по проблемам отходов, Казантип, Украина, июнь 4–8 2007. С. 289–291.

8. Болонкин В. М. // «Теплогенератор». *Декларационный патент Украины*. № 59142. Заявл. 06.05.03; Опубл. 12.08.03. Бюл. № 8, с. 4.

9. Кривоносов Г. А., Шушляков А. В. // «Новое поколение печей на твердом топливе», Харьков, 2014, С. 120.

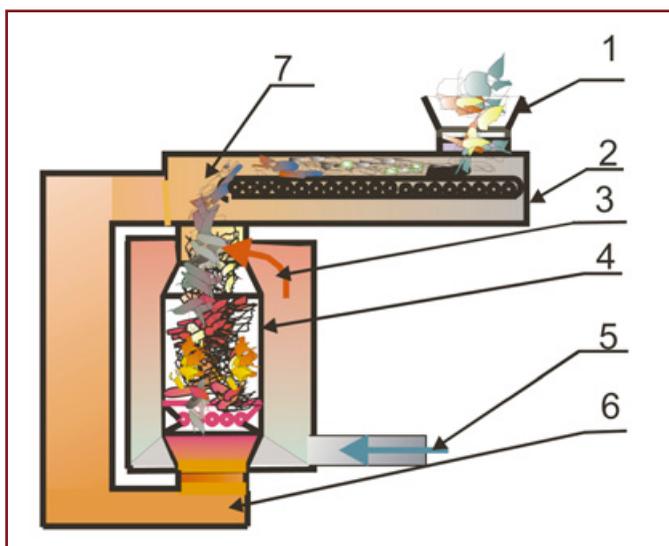


Рис. 3. Макет сжигателя ТКО: 1 – бункер загрузки ТКО; 2 – подогреваемый транспортер; 3 – вход подогретого воздуха в топку; 4 – топка; 5 – вход холодного воздуха для его нагрева; 6 – выход продуктов окисления из топки; 7 – вход горячего газа для сушки сырья