

УДК 628.474.3

ОПЫТ ВТИ ПО СЖИГАНИЮ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В СЛОЕВЫХ ТОПКАХ

Тугов А.Н., Тумановский А.Г., Москвичев В.Ф.

ОАО «ВТИ», г. Москва

ТЭС, основным топливом которых являются твердые бытовые отходы (ТБО), являются наиболее доступным и экономически целесообразным возобновляемым источником энергии. В настоящее время только в Европе за счет термической утилизации отходов вырабатывается более 28 млрд. кВт-ч электроэнергии и примерно 70 млрд. кВт-ч тепловой энергии. В США суммарная электрическая мощность установок, сжигающих ТБО, составляет 2700 МВт. При этом следует отметить, что помимо энергообеспечения путем термической переработки отходов решается важная социальная проблема – очистка крупных городов от ТБО.

Основным способом термической переработки ТБО на сегодня является их прямое сжигание. (Известны также технологии, основу которых составляют процессы газификации, пиролиза, сжигания в шлаковом расплаве и т.д., в том числе с использованием плазматронов). В настоящее время в мире эксплуатируется более 2 тыс. установок, сжигающих ТБО на механических колосниковых решетках, около 200 топок для термической переработки отходов в кипящем слое, примерно 20 барабанных печей, где сжигают ТБО, а также единичные установки с использованием пиролиза и газификации.

ВТИ на промышленных установках выполнил исследования трех технологий слоевого сжигания ТБО: на механической переталкивающей колосниковой решетке, в вихревом кипящем слое и в топке с неподвижным подом.

Специфика котельных установок, сжигающих твердые бытовые отходы, по сравнению с традиционными котлами, обусловлена необходимостью сжигать их с большими избытками воздуха ($\alpha \sim 1,8$) из-за широкого диапазона изменения теплоты сгорания и элементного состава компонентов ТБО; обязательной выдержкой газообразных продуктов сгорания при температуре более 850 °С в течение 2 сек. и более для деструкции органических загрязнителей, в первую очередь, полихлорированных дибензодиоксинов и фуранов (ПХДД/ПХДФ); ограничением температуры дымовых газов на входе в конвективные поверхности (не более 750 °С) по условиям минимизации шлакования этих поверхностей; поддержанием оптимальной для работы системы газоочистки температуры дымовых газов на выходе из котла (обычно 180...200 °С); применением многоступенчатой системы газоочистки.

Основной объем экспериментальных исследований выполнен на вводимых в эксплуатацию предприятиях: московских спецзаводах (МСЗ) № 2 и 4 и Череповецком заводе для комплексной переработки отходов с целью:

- уточнить характеристики процесса сжигания ТБО в слое и определить факторы, оказывающие ключевое влияние на надежность работы сжигательного устройства;

- оценить качество сжигания отходов с точки зрения наиболее полного выгорания органики (минимального содержания горючих в золошлаковых остатках – ЗШО);
- оценить энергетическую (тепловую) эффективность (КПД) котельных установок;
- определить состав дымовых газов, образующихся при сжигании отечественных ТБО, и сравнить с зарубежными данными;

Слоевое сжигание ТБО на механической переталкивающей колосниковой решетке.

Закономерности сжигания ТБО в слое на механических колосниковых решетках в основном исследовали на МСЗ №2, производительностью 130,0 тыс. тонн в год по ТБО, где генерируемый тремя энерготехнологическими установками пар утилизируется в трех турбинах П-1,2-13/6. Проектная производительность каждой энерготехнологической установки по ТБО с теплотой сгорания 6285 кДж/кг составляет 8,33 т/ч. Схема технологического процесса термической переработки ТБО, реализованная на этом предприятии, представлена на рис. 1.

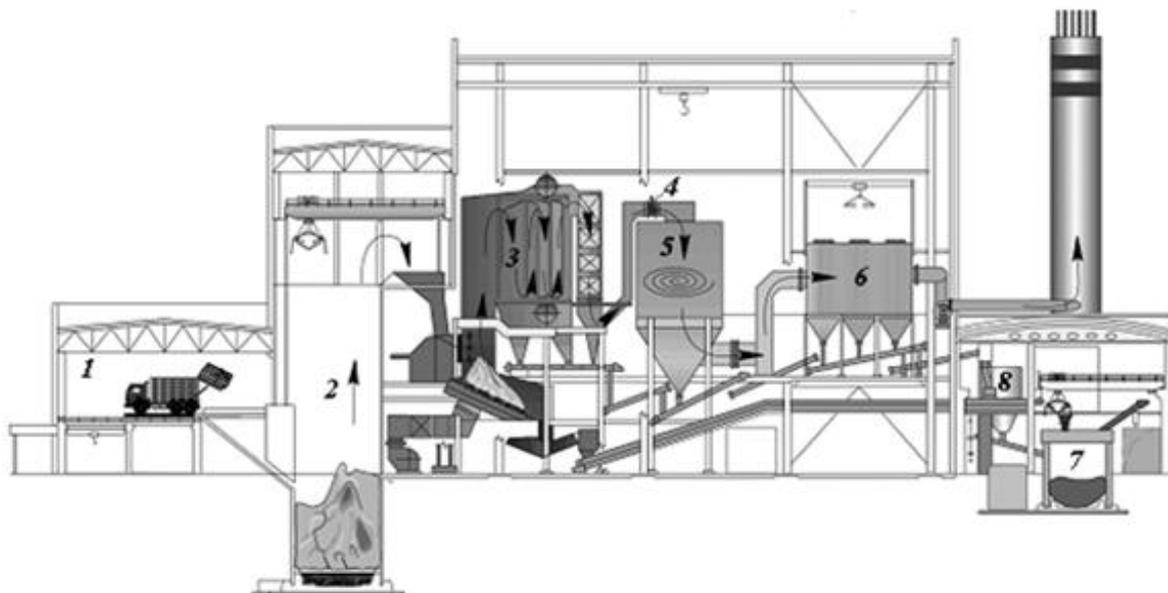


Рис. 1. Схема процесса термической утилизации ТБО на МСЗ №2 (показана одна энерготехнологическая установка): 1 – приемное отделение для ТБО; 2 – приемный бункер; 3 – котлоагрегат; 4 – узел подачи активированного угля и извести; 5 – абсорбер; 6 – рукавный фильтр; 7 – бункер шлака; 8 – бункер золы (продуктов газоочистки).

Известно, что в слое отходов на колосниковой решетке происходят следующие процессы: их прогрев и сушка, выход летучих веществ, воспламенение (зажигание) и горение, дожигание в шлаке несгоревшего коксового остатка.

Обобщая результаты исследований, установлено, что при организации топочного процесса на переталкивающей колосниковой решетке желательно, чтобы начало зоны интенсивного выгорания коксового остатка приходилось примерно на середину решетки. Допускается смещение этой зоны влево или вправо, если соответственно процесс сушки интенсифицируется, например, за счет подогрева воздуха до более высоких температур, или затягивается при сжи-

гании более влажных отходов. Понятно, что в последнем случае рабочая длина решетки – l должна быть увеличена. Процесс выгорания коксового остатка должен в основном завершаться при $l/l_p = 0,8-0,85$, где l_p – общая длина решетки. В целом же, как правило, следует стремиться, чтобы расположение зон по длине решетки, где обеспечивается протекание преобладающего для основной массы ТБО конкретного процесса, выглядело следующим образом:

- прогрев и сушка – $0 \dots (0,2-0,25)l_p$;
- выход и горение основной доли летучих – $(0,25 \dots 0,3)l_p$;
- выгорание бóльшей части коксового остатка – $(0,5 \dots 0,6)l_p$.

В этом случае температура в зоне интенсивного горения коксового остатка после выхода летучих достигает 1500 К или 1227 °С, что вполне достаточно для соблюдения требований [1].

Выделить упомянутые выше зоны удастся путем регулируемой подачи воздуха в конкретную зону решетки, температурой этого воздуха, скоростью перемещения колосников и изменением слоя шлака в конце решетки за счет подъема и опускания вращающего валика.

Периоды подготовки (прогрева и сушки), воспламенения, горения и дожигания отходов на колосниковой решетке в значительной степени зависят от производительности установки и свойств отходов. Эти стадии, происходящие на решетке, определяют удельную нагрузку (тепловое напряжение) зеркала горения колосниковой решетки (q_F) и тепловое напряжение топочной камеры (q_V), которые не должны превышать допустимые значения.

Тепловое напряжение зеркала горения решетки q_F рассчитывают по формуле:

$$q_F = B \cdot Q_i^r / (3600 \cdot F), \text{ кВт/м}^2, \quad (1)$$

где B – количество сжигаемых отходов, кг/ч; F – фактическая площадь колосниковой решетки, м²; Q_i^r – удельная теплота сгорания отходов кДж/кг.

По данным [2] эта величина не должна превышать 900-1200 кВт/м². Однако на практике фирмы-поставщики колосниковых решеток несколько снижают предельное значение теплового напряжения зеркала горения.

Тепловое напряжение топочной камеры q_V определяют как:

$$q_V = Q_i^r \cdot B / (3600 \cdot V), \text{ кВт/м}^3, \quad (2)$$

где V – объём топочной камеры, м³.

С уменьшением площади колосниковой решётки и увеличением производительности установки теплонапряжение топочной камеры возрастает. Считается, что для ТБО значение q_V не должно превышать 420 кВт/м³ ($1500 \cdot 10^3$ кДж/(м³ · ч)). В [2] указывается, что эта величина должна находиться в диапазоне 290–470 кВт/м³.

Для определения истинного содержания горючих веществ в ЗШО предложена оригинальная методика их оценки. Как показали предварительные испытания на установках, сжигающих ТБО, принятый в отечественной теплоэнергетике способ определения горючих веществ по потерям массы при прокаливании (П.п.п.) для золошлаковых остатков ТБО дает заведомо завышенные результаты.

Установлено, что значительная часть этих потерь связана с удалением гигроскопической и кристаллогидратной влаги, а также с разложением карбона-

тов кальция с выделением CO_2 . В табл. 1 показана структура П.п.п. силикатной части шлака ТБО (меньше 3 мм), наиболее проблемной и оказывающей определяющее влияние на общее значение этих потерь.

Таблица 1 Структура П.п.п. силикатной части шлака МСЗ №2, %

Наименование	17.05.02	13.09.02	21.03.06	22.03.06	23.03.06
П.п.п. из-за дегидратации алюмосиликатов и $\text{Ca}(\text{OH})_2$	2,5	2,6	1,14	1,07	0,72
П.п.п за счет разложения CaCO_3	2,9	8,0	1,53	1,43	1,45
П.п.п. за счет выгорания горючих веществ	2,4	5,4	0,38	0,71	0,73
Общие П.п.п.	7,8	16,0	3,05	3,21	2,90

Из таблицы следует, что П.п.п. за счет выгорания горючих веществ (органической части и коксового остатка) составляют только 12...34 % общих потерь, а среднее содержание горючих веществ в шлаке МСЗ № 2 – менее 2 %.

П.п.п. золы-уноса при сжигании ТБО в топках с колосниковыми решетками тоже довольно значительны (14...25,6 %), тем не менее, также как и для шлака, основные потери связаны с удалением воды при дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и алюмосиликатов, а также удалением CO_2 из карбоната кальция. Содержание же горючих в золе-уноса не превышает 2 %.

С учетом специфичных свойств ЗШО, образующихся при сжигании ТБО, для оценки потерь тепла от механической неполноты сгорания (Q_4), была предложена формула [3, 4]:

$$Q_4 = B_{\text{шл}} \cdot \frac{100 - W_{\text{шл}}^r}{100} [19600 \bar{m}_m (1 - A_m^d) + 32700 \bar{m}_c (C_{\text{шл},c} - 0,22 C_{\text{шл},c}^{2/3})] + 32700 B_z C_{\text{ун}}, \quad (3)$$

где $B_{\text{шл}}$ и B_z – расходы шлака и золы, кг/ч; \bar{m}_m , \bar{m}_c – удельные массовые доли мягкой и силикатной частей шлака; A_m^d – зольность мягкой части, определяемая при исследованиях потерь при прокаливании; $C_{\text{шл},c}$ и $C_{\text{ун}}$ – содержание горючих в силикатной части шлака и золе на сухую массу, определяемые термогравиметрическим методом; $W_{\text{шл}}^r$ – влажность шлака, %.

Именно эта формула использовалась для обработки данных, полученных в результате испытаний для определения КПД котельной установки. В целом же основу метода определения КПД составили балансовые испытания, по результатам которых на основе измеренных параметров сводится тепловой баланс сжигательного и утилизационного оборудования. Такие испытания выполнялись во время режимно-наладочных работ и в последующий период эксплуатации МСЗ №2. В результате установлено, что КПД котельного агрегата соответствует современным мировым показателям для таких установок и составляет 73-75 % [5].

В процессе испытаний были измерены также концентрации некоторых компонентов в неочищенном газе (после котла), образующиеся при сжигании ТБО, которые затем сравнивались с характерными величинами, полученными на подобных зарубежных установках. Установлено, что высокая температура и избыток окислителя в котле обеспечивают достаточно полное преобразование утилизируемых ТБО в устойчивые продукты окисления; концентрация регламентированных вредных веществ в неочищенных газах находится на уровне зарубежных

аналогов, а по HCl, HF и SO₂ даже несколько ниже [6]. Таким образом, выбранные в процессе наладочных испытаний режимы термической переработки ТБО позволяют обеспечить после дополнительной газоочистки экологически приемлемые выбросы вредных веществ в атмосферу, соответствующие нормативным значениям, установленным Директивой ЕС по сжиганию отходов [1].

Сжигание ТБО в вихревом кипящем слое

Суть этой технологии заключается в том, что в нижней части топки, в которой происходит основное горение ТБО, за счет соответствующей подачи воздуха, формы решетки и конструкции топки формируются парные вихревые зоны – так называемый вихревой кипящий слой. Для удаления шлака используют контур внешней циркуляции материала слоя, состоящий из водоохлаждаемых шнеков выгрузки, вибросита, из которого крупная зола слоя (шлак) отводится из установки, а мелкая зола с помощью горизонтального шнека и элеватора поступает в перепускной бункер и возвращается в топку.

В состав МСЗ №4, общей производительностью 250,0 тыс. тонн ТБО в год, на котором исследовалась эта технология, входят три энерготехнологические установки, где ТБО сжигают в вихревом кипящем слое, и две турбины электрической мощностью 6 МВт.

Каждая энерготехнологическая установка, кроме топки, включает в себя расположенные за ней последовательно по ходу газов котел-утилизатор, циклон, абсорбер, в котором распыливают известковое молоко, узел подачи реагентов для улавливания ПХДД/ПХДФ и ртути, рукавный фильтр и дымосос (рис. 2).

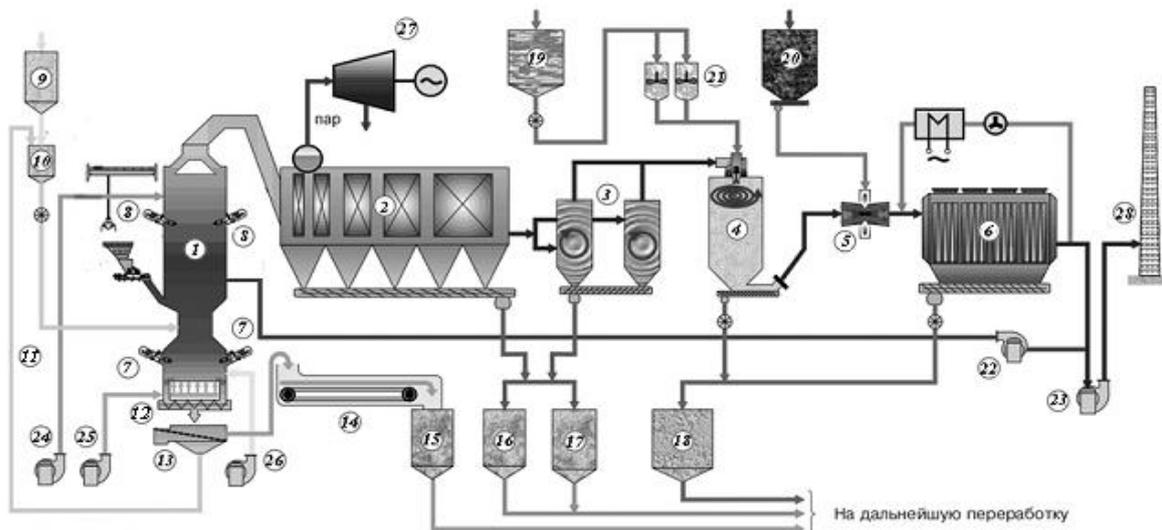


Рис. 2. Схема энергетической утилизации ТБО на МСЗ №4: 1 – топка с кипящим слоем; 2 – котел-утилизатор; 3 – циклон; 4 – распылительный абсорбер; 5 – узел подачи реагентов; 6 – рукавный фильтр; 7, 8 – газовые горелки; 9 – бункер песка; 10 – перепускной бункер; 11 – элеватор; 12 – шнеки выгрузки; 13 – вибросито; 14 – шлаковый транспортер; 15...18 – бункеры твердых остатков; 19, 20 – бункеры реагентов; 21 – резервуар для приготовления известкового молока; 22 – дымосос рециркуляции газов (не используется); 23 – дымосос; 24...26 – вентиляторы воздуха; 27 – турбоагрегат; 28 – дымовая труба.

Основной объем исследований был направлен на изучение процессов, протекающих в зоне кипящего слоя, и оценку влияния ключевых факторов на надежность работы топки.

Установлено, что в отличие от сжигания на колосниковой решетке, при сжигании отходов в вихревом кипящем слое любые нарушения:

- в распределении или расходе первичного (ожижающего) воздуха;
- в работе контура внешней циркуляции материала слоя;
- связанные с выбегом температуры слоя за установленные пределы;
- вызванные попаданием и накоплением крупных материалов, в первую очередь металлических фрагментов, в слое, могут вызвать его шлакование, которое приводит к продолжительному останову всей энерготехнологической установки.

Большое внимание было уделено определению допустимых температур в зоне кипящего слоя. Установлено, что при температуре выше $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ велика вероятность шлакования слоя и интенсивного образования отложений на стенах топки, а сжигание отходов при температуре менее $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит с неполным сгоранием отдельных компонентов ТБО, что в конечном итоге вызывает завал пода топки непрогоревшими отходами.

Исследованы возможные способы регулирования этой температуры: путем сжигания дополнительного топлива в горелках, размещенных в зоне кипящего слоя и предназначенных для растопки (см. поз. 7, рис. 2), за счет впрыска воды, изменением расхода и перераспределением подаваемого под решетку воздуха и др.

Важным итогом исследований технологии сжигания в вихревом кипящем слое является полученная количественная оценка образующихся ЗШО и их распределение между шлаком (золой слоя) и золой-уноса по тракту энерготехнологической установки (рис. 3).

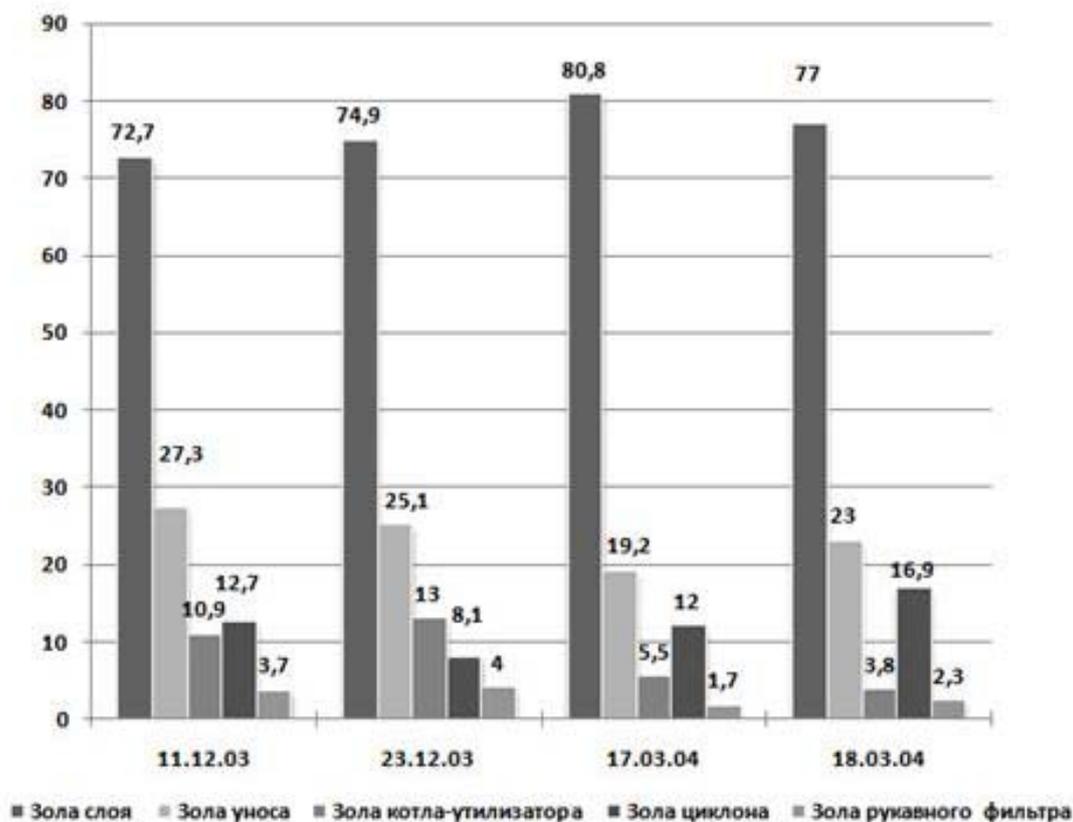


Рис. 3. Результаты балансовых опытов по определению доли образующихся шлака (золы слоя) и золы-уноса и ее улавливанию по тракту установки, %.

Установлено, что в отличие от колосникового сжигания при сжигании в вихревом кипящем слое уносится в 2,0...3,5 раза больше золы, и соответственно доля золы-уноса составляет 20...30 % от общего количества ЗШО, бóльшая ее часть оседает в котле-утилизаторе и циклоне (более 85 % общего количества летучей золы).

П.п.п. в пробах ЗШО, образующихся при сжигании ТБО в вихревом кипящем слое, оказались очень низкими: в шлаке они не обнаружены, в мелкой фракции и циркулирующем материале составляют всего 0,65 и 0,34 % соответственно. В золе-уноса, уловленной в котле-утилизаторе и циклоне П.п.п. также малы и не превышают 1,3 %.

По результатам исследований на МСЗ № 4 были разработаны новые и внесены изменения в имевшиеся алгоритмы управления процессом сжигания, что значительно повысило надежность работы топki и в целом всей энерготехнологической установки и обеспечило экологически безопасные выбросы регламентируемых веществ с уходящими газами.

Сжигание ТБО: в топке с неподвижным подом

Исследования технологии сжигания ТБО в слоевых топках с неподвижным подом выполняли на двух небольших установках (1,5 т ТБО в час.) Череповецкого завода по комплексной переработке отходов. В основном эти исследования были направлены на оценку возможности эффективного улавливания «кислых» газов и ПХДД/ПХДФ за счет подачи в поток дымовых газов щелочного сорбента и активированного угля и последующего улавливания твердой фазы в рукавном фильтре.

Принципиальная схема переработки ТБО на установках этого завода представлена на рис. 4.

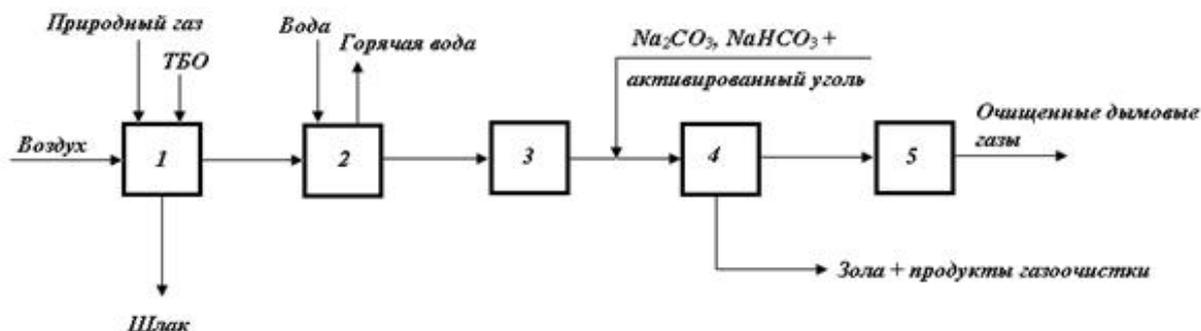


Рис. 4 Принципиальная схема термической утилизации ТБО на Череповецком заводе для комплексной переработки отходов: 1 – топка; 2 – котел-утилизатор; 3 – труба Вентури; 4 – рукавный фильтр; 5 – дымосос.

Для интенсивного перемешивания и равномерного распыла подаваемых реагентов газоход в районе их ввода выполнен в виде сужающего устройства (трубы Вентури). В качестве сорбента были использованы бикарбонат натрия и оксид кальция (последний в свою очередь является отходом металлургического комбината). В результате выполненных режимных опытов были достигнуты среднесуточные концентрации HCl и SO₂ в дымовых газах на уровне 12...14 мг/м³ и 30...35 мг/м³ [6], приемлемом, по крайней мере, для небольших (1...5 т/ч по ТБО) установок.

Результаты определения концентраций ПХДД/ПХДФ в газообразных продуктах сгорания ТБО показали, что степень улавливания из дымовых (уходящих) газов ПХДД (особенно тетра- и пента-ХДД) достигает практически 100%. Степень улавливания ПХДФ несколько меньше, но в целом общая концентрация диоксинов и фуранов после газоочистки составила менее 0,07 нг/м³, что вполне удовлетворяет требуемым мировым нормативам.

Результаты наладочных испытаний вновь введенных энерготехнологических установок для термической утилизации ТБО и опыт последующего периода их промышленного освоения и эксплуатации показали, что для несортированных отечественных твердых бытовых отходов наиболее предпочтительным способом их термической переработки является сжигание в слоевых топках с переталкивающей колосниковой решеткой. Технологию сжигания в вихревом кипящем слое целесообразно использовать для сжигания подготовленных ТБО (например, после их сортировки и дробления) совместно с другими городскими отходами, например, осадком сточных вод.

Реализованная на этих предприятиях система газоочистки с подачей в поток дымовых газов щелочного сорбента и активированного угля с последующим эффективным улавливанием твердой фазы в рукавном фильтре позволяет добиться требуемой очистки дымовых газов с соблюдением всех нормативных мировых требований, регламентируемых, например, Директивой ЕС [1].

Литература

1. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on incineration of waste// Official Journal of European Communities, 28.12.2000.- P. 332/91-332/111
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и доп.- СПб: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
3. Тугов А.Н., Дик Э.П., Соболева А.Н. Особенности расчета тепловых потерь от механической неполноты сгорания твердых бытовых отходов// Промышленная энергетика. – 2001. – № 9. – С. 45-49.
4. Дик Э.П., Сотсков Е.В., Тугов А.Н. Расчет потерь тепла с механическим недожогом при термическом обезвреживании твердых бытовых отходов// Электрические станции. – 2003. – № 11. – С. 16-17.
5. Тугов А.Н., Москвичев В.Ф., А.Н.Рябов и др. Опыт освоения сжигания твердых бытовых отходов на отечественных ТЭС// Теплоэнергетика. – 2006. – № 7. – С. 55-60.
6. Угначев В.И., Епихин А.Н., Тугов А.Н. Контроль работы газоочистного оборудования на установках для сжигания твердых бытовых отходов//Теплоэнергетика. – 2001. – № 12. – С. 52-56.