

*На правах рукописи*



**ТУГОВ**  
**Андрей Николаевич**

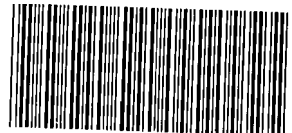
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ТЕХНОЛОГИЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ  
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЭС НА ТБО**

Специальность: 05.14.14 – “Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты”

27 СЕН 2012

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2012



005052427

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт" (ОАО "ВТИ").

Официальные оппоненты:

*Григорьев Константин Анатольевич* – доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Реактор- и парогенераторостроение» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета;

*Зайченко Виктор Михайлович* – доктор техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией «Проблем энергосбережения» Объединенного института высоких температур РАН;

*Ходаков Юрий Степанович* – доктор химических наук, старший научный сотрудник.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ»)

Защита состоится " 1 " ноября 2012 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.222.001.01 при ОАО "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт" (ОАО "ВТИ") по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ОАО "ВТИ".

Автореферат разослан " 7 " ..... 09 ..... 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.222.001.01,  
кандидат технических наук

*П. А. Березинец*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одно из ключевых направлений долгосрочной энергетической политики Российской Федерации связано с использованием возобновляемых источников для производства электрической энергии. Установлены целевые показатели использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в сфере электроэнергетики: предусматривается увеличение их доли в общем энергобалансе страны с 0,9 % в 2011 г. до 2,5 % к 2015 г. и до 4,5 % к 2020 г., что составит около 80 млрд кВт·ч выработки электроэнергии с использованием ВИЭ в 2020 г. при 8,5 млрд кВт·ч в настоящее время.

Как показывает мировой опыт, самым доступным и одним из наиболее экономически целесообразных возобновляемых источников энергии являются твердые бытовые отходы (ТБО), сжигаемые на тепловых электростанциях ТЭС (ТЭС на ТБО). ТБО – это топливо, которое по теплоте сгорания сопоставимо с торфом и некоторыми марками бурьих углей, образуется в местах, где электроэнергия наиболее востребована, т. е. в крупных городах, и имеет гарантированное предсказуемое возобновление, пока существует человечество. Работа ТЭС на ТБО не зависит от природных условий (в отличие, например, от солнечных или ветровых установок), географического расположения (по сравнению с геотермальными и приливными электростанциями), и в результате ее эксплуатации, помимо выработки энергии, решается важная социальная задача – утилизируются образующиеся в процессе жизнедеятельности человека бытовые отходы.

В России до недавнего времени предприятия для сжигания отходов находились вне сферы интересов энергетиков. Переработкой ТБО занимались коммунальные службы, которые в первую очередь решали проблему санитарной очистки городов от образующихся отходов. Выделяющуюся в процессе сжигания энергию использовали для покрытия собственных теплофикационных нужд и, в лучшем случае, отпускали излишки в тепловые городские сети.

В отличие от России за рубежом в настоящее время значительная часть предприятий для сжигания отходов принадлежит ведущим энергетическим компаниям, и интерес энергетиков к этому источнику энергии продолжает возрастать. ТБО уже давно и практически во всех промышленно развитых странах рассматриваются как один из перспективных возобновляемых источников получения электроэнергии. В результате утилизации ТБО только в Европе уже сейчас ежегодно вырабатывается более 28 млрд кВт·ч электроэнергии и примерно 70 млрд кВт·ч тепловой энергии. Это позволяет экономить 7...38 млн тонн органического топлива и, кроме того, предотвращать до 37 млн тонн в год выбросы парниковых газов (в пересчете на  $\text{CO}_2$ ), которые могли бы выделиться в виде метана при полигонном захоронении отходов. Повсеместно ведется строительство новых ТЭС на ТБО, причем, как правило, со значительной долей капитальных вложений со стороны энергетических компаний.

Настоящая диссертационная работа посвящена решению актуальных задач технического, экономического и технологического характера, обеспечивающих создание и широкое внедрение в условиях России тепловых электростанций на основе широкодоступного ВИЭ – ТБО.

*Цель* – на основе полученных результатов лабораторных и промышленных исследований разработать технологические основы экологически безопасного метода энергетической утилизации ТБО для создания отечественной ТЭС на ТБО с учетом мирового опыта, перспективных направлений в развитии российской электроэнергетики и современного состояния отечественного машиностроения в России.

#### **Направления исследования**

1. Аналитический обзор существующего положения в области энергетического использования ТБО в России и за рубежом.

2. Исследование теплотехнических характеристик ТБО, отдельных составляющих компонентов и их минеральной части.

3. Экспериментальное исследование процессов термической утилизации ТБО на действующих в России установках.

4. Разработка теоретических положений и экспериментальное исследование принципиально новой для России технологии сжигания ТБО в вихревом кипящем слое.

5. Повышение эффективности преобразования энергии ТБО в электрическую и тепловую энергии.

6. Лабораторные и полупромышленные исследования коррозионной стойкости различных марок сталей в обоснование повышения параметров пара энергоустановок.

7. Экспериментальное обоснование эффективности применения технологии очистки образующихся при сжигании ТБО дымовых газов с применением полусухого метода.

8. Расчетно-экспериментальный анализ твердых остатков, образующихся при сжигании ТБО, и выбор метода их дальнейшей утилизации.

9. Обоснование основных технико-экономических показателей современной отечественной ТЭС на ТБО.

10. Разработка профиля отечественной ТЭС на ТБО.

#### **Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов и выводов**

В работе использованы апробированные методы исследования и сертифицированные в России методики измерений. Решения поставленных задач базируются на экспериментальных данных и общепринятых теоретических положениях теплотехники и математического моделирования. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается использованием известных положений фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с данными лабораторного эксперимента и промышлен-

ных испытаний, результатами многолетней эксплуатации технологического оборудования, а также результатами исследований других авторов.

#### **На защиту выносятся:**

- 1) методика и результаты определения характеристик и свойств ТБО, которые необходимы при проектировании ТЭС на ТБО, проведении наладочных работ и составлении режимных карт на действующих объектах;
- 2) методика проведения и результаты испытаний на энерготехнологических установках, основным топливом которых являются ТБО;
- 3) результаты практического освоения принципиально новой для России технологии сжигания ТБО в вихревом кипящем слое;
- 4) экспериментальные данные по коррозионной стойкости материалов труб для пароперегревательных поверхностей нагрева котлов, сжигающих ТБО;
- 5) результаты исследования эффективности сухого и полусухого методов очистки газообразных продуктов сгорания от токсичных составляющих, образующихся при сжигании отечественных ТБО;
- 6) профиль и технико-экономические показатели перспективной отечественной ТЭС на ТБО.

#### **Научная новизна**

Впервые в России выполнены комплексные систематические исследования процессов и технологий, обеспечивающие экологически безопасное использование ТБО на ТЭС и обосновавшие возможность широкого использования в РФ электростанций, основным топливом которых являются ТБО.

Разработана, протестирована и принята в виде стандарта предприятия методика определения теплотехнических характеристик ТБО, необходимых для выбора и эффективной эксплуатации технологического оборудования предприятий для термической переработки ТБО.

Разработана методика проведения испытаний на энерготехнологических установках, основным топливом которых являются ТБО. С ее помощью выполнены экспериментальные исследования процессов термической переработки ТБО на нескольких действующих в России установках. Проведено освоение принципиально новой для России технологии сжигания ТБО в вихревом кипящем слое. Определены пути повышения эффективности преобразования энергии ТБО в электрическую и тепловую.

Получены и обобщены экспериментальные данные по коррозионной стойкости материалов труб для пароперегревательных поверхностей нагрева котлов, сжигающих ТБО, на основании которых определены приоритетные марки сталей для этих поверхностей при проектировании отечественных котлов.

Установлено и исследовано влияние минеральной части ТБО на связывание в газоходах котла газообразных соединений серы, хлора и фтора, образующихся в процессе сжигания, содержание которых в уходящих газах нормируется природоохранными органами.

Впервые в России на промышленных установках проведены экспериментальные исследования эффективности различных технологий очистки газооб-

разных продуктов сгорания, образующихся при сжигании отечественных ТБО, от вредных веществ, включая полихлорированные дибензо-пара-диоксины (ПХДД) и полихлорированные дибензофураны (ПХДФ).

Новизна технических решений подтверждается пятью патентами РФ.

### **Практическая полезность**

Разработанные методические указания по проведению испытаний на установках для сжигания ТБО и методика определения их теплотехнических характеристик позволяют получить данные для составления режимных карт, оценить эффективность работы и разработать рекомендации по улучшению дальнейшей эксплуатации подобных установок.

Расчетно-аналитические и экспериментально полученные результаты исследований на котельном и газоочистном оборудовании составляют методологическую основу для проектирования отечественных современных ТЭС на ТБО.

### **Реализация результатов работы**

Результаты работы использованы:

- при проведении пусконаладочных испытаний на Череповецком заводе для комплексной переработки ТБО и Московском спецзаводе (МСЗ) № 4;
- в виде проектно-конструкторской документации по реконструкции МСЗ № 2 и 4 с целью повышения их производительности;
- в технических предложениях по созданию отечественных типовых энерго-технологических комплексов для термической переработки ТБО с выработкой тепловой и электрической энергии (ТЭС на ТБО), разработанных по контракту с Правительством Москвы.

### **Апробация работы**

Результаты, представленные в диссертации, получены в ходе выполнения договорных и инновационных работ в рамках научно-исследовательских программ РАО «ЕЭС России», Правительства Москвы, Минобрнауки России. Материалы исследования докладывались и получили положительную оценку на Научно-технической конференции «Развитие технологий подготовки и сжигания топлива на электростанциях» (Москва, 1996); Международной конференции «Информационные средства и технологии» (Москва, 2001); 2-й Всероссийской конференции «Процессы, технологии и оборудование для переработки отходов и вторичного сырья. Полигоны по захоронению отходов» (Самара, 2003); 2-й Международной конференции «Энергия из биомассы» (Киев, 2004); 2-й Всероссийской школе-семинаре молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (Москва, 2004); Международном семинаре «Европейский Союз-Россия. Совместная программа исследований в области биоэнергетики» (Москва, 2004); 4-м и 5-м Международных конгрессах по управлению отходами (ВэйстТэк) (Москва, 2005, 2007); V Международной научно-технической конференции «Повышение эффективности производства электро-энергии» (Новочеркасск, 2005); VII Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (Красноярск, 2006); 4-й научно-практической конференции «Минеральная часть топли-

ва, шлакование, загрязнение и очистка котлов» (Челябинск, 2007); с 3-й по 7-ю Международных научно-практических конференциях «Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии» (Москва, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011); на 3-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики» (Екатеринбург, 2007); 9-th Int. Conf. on CFB «Circulating Fluidized Bed Technology IX» in conjunction with 4-th Int. VGB Workshop «Operating Experience with Fluidized Bed Firing Systems» (Hamburg, Germany, 2008); Международном семинаре «Сотрудничество в области энергетических технологий: глобальные вызовы и согласованные действия» (Москва, 2008); 3-й Международной конференции «Альтернативные источники энергии для больших городов – 2008» (Москва, 2008); 2-й научно-практической конференции «Комплексное использование вторичных ресурсов и отходов» (Санкт-Петербург, 2009); Научно-практической конференции «ЗАО «Энергомаш (Белгород)» –70 лет в энергетике» (Белгород, 2009); Круглом столе «Использование возобновляемых источников энергии в ЖКХ» в программе 5-й специализированной отраслевой выставки «ЖКХ-2010: технологии, инновации, новое качество» (Москва, 2010); круглом столе «Перспективы получения тепловой и электрической энергии при утилизации твердых бытовых отходов в условиях мегаполиса» в рамках VIII Международного форума «Топливо-энергетический комплекс Украины: настоящее и будущее» (Киев, 2010); Международной конференции Waste to Business Solutions «Перспективы производства и потребления альтернативного топлива из отходов в России» (Москва, 2010); Конференции Международной ассоциации по твердым отходам (ISWA) «Передовые технологии переработки и захоронения отходов: ориентиры применения и критерии выбора» (Москва, 2011); 5-й научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы» (Челябинск, 2011); XXII Международной конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики» (Ялта, 2012). По теме диссертации делались сообщения и доклады на научно-технических советах ВТИ в 1996–2012 гг.

### **Публикации**

По результатам выполненных исследований опубликовано 77 научных работ, в том числе 26 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, одна монография и пять патентов РФ.

### **Структура и объем**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, 3 приложений, изложена на 349 страницах машинописного текста, включающих 112 рисунков, 92 таблицы и библиографический список из 229 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ современного мирового состояния в области использования ТБО в качестве возобновляемого источника энергии и дано понятие о ТЭС на ТБО.

Показано, что за рубежом практически на всех современных предприятиях выделяемая в процессе термической переработки ТБО энергия обязательно преобразуется в тепловую для отпуска потребителю или для дальнейшей выработки электроэнергии. Европейским законодательством предложена формула оценки энергоэффективности ( $\mathcal{E}$ ) таких предприятий, которую применительно к российским условиям можно представить следующим образом:

$$\mathcal{E} = \frac{[E_p - (E_f + E_i)]}{[0,97 \cdot (E_w + E_i)]},$$

где  $E_p$  – энергия, отпущенная потребителю в виде тепла или электроэнергии, ГДж/год. Эта величина умножается на коэффициент 1,1 при отпуске тепла и на 2,6 при выработке электроэнергии;  $E_f$  – теплота дополнительного топлива, затраченного на производство энергии, ГДж/год;  $E_w$  – энергия, содержащаяся в перерабатываемых отходах, рассчитанная с учетом их теплоты сгорания, ГДж/год;  $E_i$  – импортируемая энергия, получаемая от внешнего поставщика, ГДж/год, исключая  $E_w$  и  $E_f$ ; 0,97 – коэффициент, учитывающий тепловые потери с золошлаками и в окружающую среду.

На современных предприятиях с экономической и экологической точек зрения энергетическая эффективность процесса составляет 0,60 – 0,65 (60 – 65 %).

Если предприятие, удовлетворяющее этому требованию, специализируется на отпуске электроэнергии внешнему потребителю (или на комбинированном отпуске тепловой и электрической энергии), его можно считать ТЭС на ТБО. Вырабатывать электроэнергию за счет термической утилизации ТБО становится экономически целесообразным, если доходы от продажи электроэнергии покрывают расходы, связанные с дополнительными капитальными и эксплуатационными затратами на приобретение, установку и обслуживание основного и вспомогательного электрогенерирующего оборудования. Для каждой конкретной страны с учетом сложившихся в ней тарифов на покупку электроэнергии, а также законодательства и налогообложения, производство электроэнергии на предприятиях, сжигающих ТБО, становится прибыльным, если годовой отпуск электрической энергии превышает некоторое пороговое значение. В России, например, как показывают выполненные в работе оценочные расчеты, сейчас



этот предел находится на уровне 100 тыс. МВт·ч в год (установленная электрическая мощность должна быть не менее 15 МВт).

Данные о количестве таких предприятий за рубежом иллюстрируются на рис. 1.

Практически все такие ТЭС на ТБО принадлежат ведущим мировым энергетическим компаниям.

Решающими факторами, определяющими электрическую мощность ТЭС на ТБО, являются прогнозируемый расход поступающих на переработку отходов и их свойства. (Электрическая мощность обычных ТЭС, на которых сжигают органическое топливо, как правило, выбирается исходя из потребности региона в электроэнергии).

Количество поступающих ТБО, зависит от ряда факторов к которым в первую очередь относятся численность населения, удельный объем накопления ТБО в конкретном регионе, а также политика региональных властей в области обращения с отходами с учетом наметившихся мировых тенденций в сфере управления ТБО, таких, например, как раздельный сбор и сортировка.

Адекватная оценка указанных факторов в настоящее время и на перспективу позволила разработать типовой мощностной ряд (по количеству перерабатываемых отходов) для отечественных ТЭС на ТБО: 180, 360 и 540 тыс. тонн ТБО в год. С учетом результатов экспериментально-аналитического изучения теплотехнических свойств ТБО была определена установленная электрическая мощность этих ТЭС: 12, 24 и 36 МВт.

Важным этапом создания ТЭС на ТБО является разработка и обоснование принципиальных технических и технологических решений, позволяющих максимально эффективно преобразовать энергетический потенциал ТБО в электрическую энергию с наименьшим воздействием на окружающую среду и с оптимальными показателями по надежности и экономичности.

Первоочередная задача в этом направлении – выбор метода и технологии термической переработки ТБО, которые наиболее технически приемлемы и экономически обоснованы для ТЭС на ТБО в российских условиях. К технологиям термической переработки ТБО, прошедшим промышленную апробацию, относятся: сжигание на механических колосниковых решетках в слоевых топках (в настоящее время во всем мире эксплуатируется более 2 тыс. установок), сжигание в кипящем слое (около 200 установок), сжигание в барабанных печах (примерно 20 установок), комбинированные методы с использованием процессов пиролиза и газификации, в том числе с плазматронами. Некоторые техноло-



Рис. 1 – Общее количество предприятий для термической переработки ТБО (1), включая ТЭС на ТБО (2 – установленная электрическая мощность более 15 МВт), в Германии, Франции и США

гии находятся на стадии освоения (лабораторных, стендовых и полупромышленных исследований).

По результатам анализа, проведенного с использованием разработанных технических, технологических, экологических и социально-экономических критериев, показано, что для российских ТЭС на ТБО сжигание в слоевых топках практически несортированных ТБО с минимальной их подготовкой является наиболее целесообразным и экономически обоснованным способом термической утилизации ТБО как в настоящее время, так и на обозримую перспективу.

Ключевой задачей в процессе создания отечественной ТЭС на ТБО является разработка основных путей повышения эффективности электростанции на всех стадиях, начиная от подготовки ТБО к сжиганию и заканчивая очисткой и переработкой образующихся твердых и газообразных продуктов сгорания. С целью комплексного решения этой задачи сформулированы основные направления исследований, результаты которых представлены в последующих главах.

Для получения исходных данных и проектирования типовой отечественной ТЭС на ТБО необходимо:

- сформировать концепцию топливообеспечения ТЭС на основе экспериментальных исследований свойств ТБО и их минеральной части;
- разработать и апробировать технологию эффективного сжигания ТБО на основе обобщения результатов экспериментального сжигания ТБО на действующем оборудовании;
- обосновать основные пути повышения энергетической эффективности паросилового оборудования ТЭС на ТБО;
- обосновать и экспериментально апробировать на действующих установках технологию очистки газообразных продуктов сгорания ТБО (с учетом отечественной специфики);
- исследовать характеристики и свойства золошлаковых остатков и твердых продуктов газоочистки, образующихся при сжигании ТБО, и разработать рекомендации по их переработке и утилизации.

**Во второй главе** выполнено экспериментальное определение и анализ теплотехнических свойств ТБО и их минеральной части.

ТБО представляют собой многокомпонентную гетерогенную смесь материалов с различным элементным составом, удельной теплотой сгорания и минеральной частью, а также фракционным и гранулометрическим составом. Основные горючие компоненты этой смеси известны – это пищевые и бумажные отходы, пластик, текстиль, кожа, древесина. Однако, даже зная удельные весовые показатели этих компонентов в общей массе смеси, определить интегральные теплотехнические характеристики ТБО, используя принятый в теплотехнике метод расчета, практически невозможно. Трудность заключается в том, что содержание влаги в каждом из перечисленных компонентов зависит от сезона, природных условий, места и метода сбора, культуры населения и т. д. и меняется в достаточно широком диапазоне. Кроме того, смесь горючих отходов забалластирована камнями, металлом, стеклом и другими негорючими материалами.

В этой связи была специально разработана и прошла промышленную апробацию новая оригинальная методика определения основных теплотехнических характеристик ТБО, наиболее приспособленная для прикладного использования на энергоустановках, сжигающих ТБО.

Суть методики состоит в том, что отобранная представительная проба ТБО предварительно путем просеивания через грохот с размером ячеек 50×50 мм разделяется на мелкую и крупную фракции. Последняя сортируется по компонентным группам на бумагу, текстиль, пластмассу, металл, другие неорганические материалы и пищевые отходы. Определяется массовая доля  $K'_n$  каждой из этих компонентных групп, включая долю мелкой фракции. Далее в лабораторных условиях измеряется влажность ( $W'_m$ ) и зольность на сухую массу ( $A^d_n$ ) этих компонентных групп, а затем рассчитываются интегральные значения удельной теплоты сгорания ( $Q'_i$ ), влажности ( $W'_i$ ) и зольности ( $A'$ ) в целом для ТБО по формулам:

$$Q'_i = \sum [K'_n (1 - W'_m / 100) (1 - A^d_n / 100) \cdot Q^{daf}_n] - 0,02442 \cdot \sum (K'_n \cdot W'_m);$$

$$W'_i = \sum (K'_n \cdot W'_m); A' = \frac{\sum [K'_n A^d_n (100 - W'_m)]}{\sum [K'_n (100 - W'_m)]} \cdot \left[ 1 - \frac{\sum (K'_n W'_m)}{100} \right],$$

где  $Q^{daf}_n$  – низшая удельная теплота сгорания на сухую беззольную массу (принимается по табл. 1).

Таблица 1

Низшая удельная теплота сгорания на сухую беззольную массу основных компонентных групп ТБО, МДж/кг

| Бумага | Текстиль | Пластмасса | Пищевые отходы | Мелкие отходы (менее 50 мм) |
|--------|----------|------------|----------------|-----------------------------|
| 16,9   | 22,6     | 27,4       | 18,2           | 20,1                        |

Значения, приведенные в табл. 1, получены путем определения в лаборатории ВТИ удельной теплоты сгорания для каждого вида отходов, входящих в состав компонентной группы, и последующего усреднения полученных величин для группы в целом. При определении теплоты сгорания мелкой фракции (менее 50 мм) усреднение проводили по фракциям: менее 2,5 мм; 2,5...20 мм и 20...50 мм, на которые дополнительно разделяли общую мелкую фракцию, и для каждой из них определяли удельную теплоту сгорания. Для металла и неорганических материалов удельная теплота сгорания принималась равной нулю.

Разработанная методика прошла апробацию на Московском спецзаводе № 2 (МСЗ № 2), где с ее использованием было проведено несколько опытов по определению теплоты сгорания, влажности и зольности ТБО, поступающих на сжигание. Полученные данные сравнивались с результатами балансовых тепловых испытаний, выполненных в то же время. Разница в значениях, определенных обоими способами, не превысила 6,6 % средней величины.

В дальнейшем оформленную в виде стандарта организации (СТО ВТИ 44.001–2011) методику применяли для получения исходных данных по ТБО,

которые использовались для проектирования нового и реконструкции существующего оборудования для сжигания ТБО, а также для разработки и систематического обновления режимных карт действующих установок московских заводов.

С применением методики были определены усредненные морфологический состав и характеристики ТБО, образующихся в настоящее время в столице. Полученные результаты по морфологическому составу ТБО г. Москвы приведены в табл. 2, в которую для сравнения помещены еще обобщенные справочные данные и результаты, полученные Академией коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова (АКХ) в последние годы.

Таблица 2

**Морфологический состав ТБО г. Москвы, %**

| Компоненты, %          | Справочные данные | Результаты экспериментального определения |                           |
|------------------------|-------------------|---|---------------------------|
|                        |                   | по методике АКХ*                          | по разработанной методике |
| Бумажные отходы        | 40...45           | 19,7/18,67                                | 16...20                   |
| Дерево                 | 1...2             | 0,88/0,75                                 |                           |
| Пищевые отходы         | 26...30           | 18/7,84                                   | 5...11                    |
| Текстиль               | 4...5             | 4,26/4,26**                               | 2,5...5,5                 |
| Кожа, резина           | 0,5...1           | 0,81/0,74                                 |                           |
| Металлы                | 3,5...5,5         | 1,83/1,32                                 | 1,8...4                   |
| Стекло                 | 2...3             | 16,82/14,29                               | 7...15                    |
| Камни                  | 0,5...1           | 0,98/0,93                                 | (в основном стекло)       |
| Пластмасса             | 5...6             | 14,21/12,68***                            | 15...26                   |
| Кости                  | 1...2             | —   | 32...38****               |
| Прочее                 | 1...3             | 12,1/6,69                                 |                           |
| Отсев (мелкая фракция) | 5...7****         | 10,41****/0                               |                           |

\* В числителе – общее содержание, в знаменателе – отходы более 50 мм.

\*\* Включая памперсы.

\*\*\* Суммарная с ПЭТФ.

\*\*\*\* Отсев < 15 мм.

\*\*\*\*\* Отсев < 50 мм.

Анализ таблицы показывает, что общее количество отходов с размером фракций менее 50 мм, определенные АКХ, составляет 31,83 %, что хорошо согласуется с результатами, полученными в процессе выполнения работы.

В процессе опытов определена общая влажность ТБО, которая в зависимости от времени года, атмосферных условий и особенностей сбора меняется от 32 до 44 %, и зольность (на сухую массу), значение которой варьируется в пределах 40...50 %.

Теплота сгорания на рабочую массу исследованных проб находилась в пределах 5,8...7,6 МДж/кг, иногда повышаясь почти до 8,4 МДж/кг, и зависела, в основном, от влажности ТБО. При тех колебаниях морфологического состава ТБО, указанных в табл. 2, теплота сгорания горючей части ТБО менялась в не-

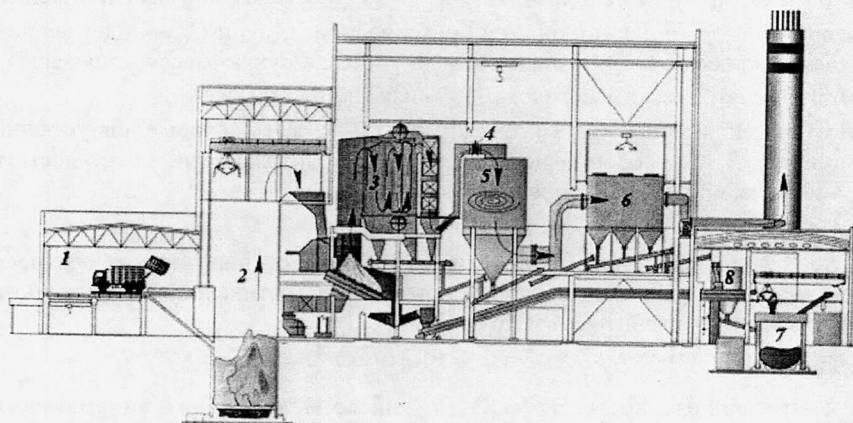
больших пределах: 21,1...22,2 МДж/кг. Элементный состав горючей массы:  $C^{daf}$  – 55...57,5 %;  $H^{daf}$  – 7,2...7,6 %;  $O^{daf}$  – 32,4...35,3 %;  $N^{daf}$  – 1,0...1,2 %;  $S^{daf}$  – 0,7...1,25 %,  $Cl^{daf}$  – 0,77...1,0 %.

Минеральная часть исходных ТБО содержит (%):  $SiO_2$  – 57,9...76,4;  $TiO_2$  – 0,4...0,6;  $Al_2O_3$  – 3,7...5,0;  $Fe_2O_3$  – 1,3...2,2;  $CaO$  – 8,1...14,0;  $MgO$  – 0,8...1,1;  $K_2O$  – 1,1...1,5;  $Na_2O$  – 2,0...4,9;  $SO_3$  – 2,7...6,2;  $P_2O_5$  – 0,9...4,4;  $Cl$  – 1,3...1,6; микроэлементы – 0,5...0,6.

**В третьей главе** обобщены результаты исследований наиболее целесообразных для российских условий технологий термической переработки ТБО: слоевого сжигания на механической колосниковой решетке и сжигания в вихревом кипящем слое. Исследования выполнены в процессе испытаний на вновь введенных в эксплуатацию предприятиях: Московских спецзаводах № 2 и 4.

МСЗ № 2, на котором реализовано слоевое сжигание отходов на механической колосниковой обратно-переталкивающей решетке, был пущен в эксплуатацию в 1999...2000 гг. В его состав входят три турбины П-1,2-13/6 Калужского турбинного завода и три энерготехнологические установки для термической переработки ТБО, основным оборудованием которых являются топка, котел-утилизатор и многоступенчатая система газоочистки с использованием карбамида, щелочного реагента и активированного угля.

На рис. 2 представлена схема технологического процесса переработки ТБО на МСЗ № 2.



1 – приемное отделение для ТБО; 2 – приемный бункер; 3 – котлоагрегат; 4 – узел подачи активированного угля; 5 – абсорбер; 6 – рукавный фильтр; 7 – бункер шлака; 8 – бункер золы

Рис. 2 – Схема процесса термической переработки ТБО на Московском спецзаводе № 2 (показана одна энерготехнологическая установка)

Специфика технологических процессов на МСЗ № 2 и вообще на установках, сжигающих ТБО, по сравнению с традиционными котлами обусловлена необ-

ходимостью сжигать ТБО с широким диапазоном изменения удельной теплоты сгорания; обязательной выдержкой газообразных продуктов сгорания при температуре более 850 °С в течение не менее 2 с для разложения ПХДД/ПХДФ, которые могут образовываться при горении ТБО; ограничением их температуры 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.

Принимая во внимание вышеуказанные особенности были разработаны методические указания по проведению испытаний, апробированные на МСЗ № 2. Для определения тепловой эффективности проводились балансовые испытания, суть которых заключается в сведении теплового баланса сжигательного и утилизационного оборудования на основе измеренных параметров. Тепловая мощность установки, т. е. теплота, отведенная рабочей средой (водой и/или паром), и потери с уходящими газами, химической неполнотой сгорания и с теплом шлака определяются принятыми в теплоэнергетике методами.

Для оценки потерь тепла от механической неполноты сгорания  $Q_4$  (кДж/ч), принимая во внимание специфические свойства образующихся золошлаковых остатков (см. гл.6), была предложена формула:

$$Q_4 = B_{\text{шл}} \cdot \frac{100 - W_{\text{шл}}^r}{100} [19600 \bar{m}_m (1 - A_m^d) + 32700 \bar{m}_c (C_{\text{шл},c} - 0,22 C_{\text{шл},c}^{2/3})] + 32700 B_3 C_{\text{ун}},$$

где  $B_{\text{шл}}$  и  $B_3$  – 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-уносе на сухую массу, определяемые термогравиметрическим методом;  $W_{\text{шл}}^r$  – влажность шлака, %.

Потери тепла от наружного охлаждения  $Q_5$  (кДж/ч), которые для установок, сжигающих ТБО, особенно небольшой производительности, могут достигать 10 % и выше, предложено определять по формуле:

$$Q_5 = 3,6 \cdot q_{5,v} (S_v + 1,075 S_r),$$

где  $S_v$ ,  $S_r$  – площади вертикальной и горизонтальной наружных поверхностей котла, м<sup>2</sup>;  $q_{5,v}$  – удельный тепловой поток через вертикальную наружную поверхность, Вт/м<sup>2</sup>, вычисляемый по формуле:

$$q_{5,v} = 0,043 (\lambda Pr^{1/3} \Delta T^{4/3} / \nu^{2/3}) + 5,39 \cdot 10^{-8} (T_{\text{см}}^4 - (T_{\text{см}} - \Delta T)^4),$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $Pr$  – число Прандтля;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с. Величины  $\lambda$ ,  $Pr$ ,  $\nu$  определяются по средней величине между температурой наружной поверхности котла ( $T_{\text{см}}$ ) и окружающего воздуха ( $T_{\text{окр}}$ ).

Температурный перепад ( $\Delta T$ ) вычисляется, как:

$$\Delta T = T_{\text{см}} - T_{\text{окр}}.$$

Для вертикальных поверхностей нагрева котла с характерным линейным размером  $L$  больше 3 м и для горизонтальных поверхностей с  $L > 0,3$  м величина  $q_{5,v}$  может определяться из рис. 3 по температуре наружной поверхности

( $T_{cm}$ ) и температурному перепаду между этой температурой и температурой окружающей среды ( $\Delta T$ ). Для вертикальных поверхностей характерным линейным размером является высота. Для горизонтальной плоской поверхности, обращенной вверх, характерный линейный размер равен отношению площади поверхности к периметру.

С использованием разработанной методики на энерготехнологических установках МСЗ № 2 были выполнены испытания, в результате которых установлено, что КПД котельного агрегата соответствует современным мировым показателям для таких установок и достигает 75 %.

Анализ результатов газовых измерений показал, что выбранные в процессе наладочных испытаний режимы термической переработки ТБО позволяют обеспечить после дополнительной газоочистки экологически приемлемые выбросы вредных веществ в атмосферу. Содержание остаточных горючих веществ, по которым судят о качестве процесса сжигания, соответствует требуемым нормативам. Таким образом, термическая утилизация отечественных ТБО с использованием технологии слоевого сжигания на механической колосниковой решетке происходит с соблюдением всех современных мировых требований и нормативов, в том числе, установленных природоохранными и санитарными органами Москвы.

Требуемые показатели были достигнуты и на МСЗ № 4, где осваивалась принципиально новая для России технология сжигания топлива в вихревом кипящем слое. Однако для их достижения потребовалось выполнить наладочные и исследовательские работы, позволившие решить проблемы, изложенные ниже.

В состав МСЗ № 4 входят две турбины Калужского турбинного завода электрической мощностью 6 МВт каждая и три энерготехнологические установки для термической переработки твердых бытовых отходов с использованием технологии сжигания в вихревом кипящем слое (рис. 4).

Суть этой технологии заключается в том, что в нижней части топки, в которой происходит основное горение отходов, 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.

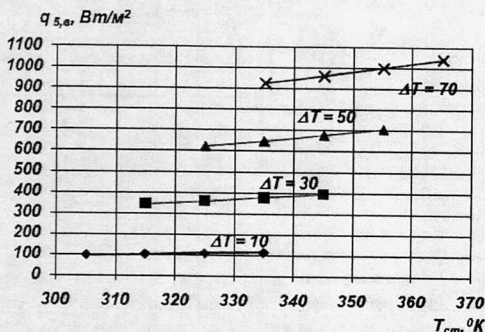
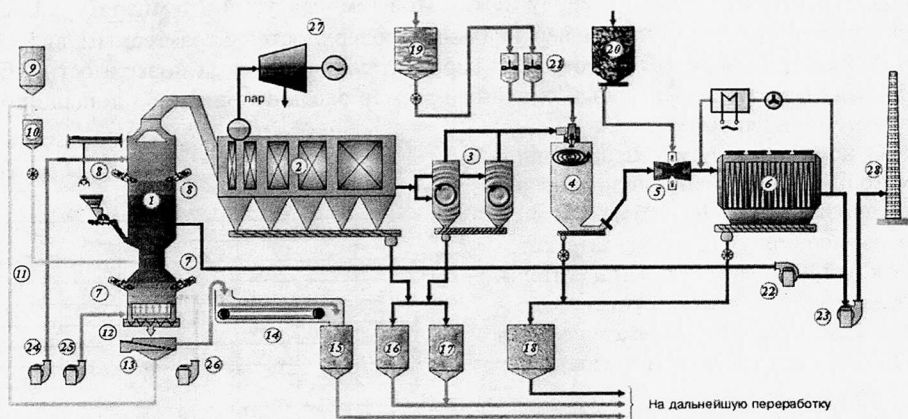


Рис. 3 – Удельные тепловые потери от наружного охлаждения вертикальных поверхностей нагрета с высотой более 3 м и  $Rt$  более 0,5



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 дымовых газов (не используется); 23 – дымосос; 24...26 – вентиляторы воздуха; 27 – турбоагрегат; 28 – дымовая труба.

Рис. 4 – Схема энергетической утилизации ТБО на МСЗ № 4

Кроме топки, в состав каждой энерготехнологической установки входят расположенные за ней последовательно по ходу газов котел-утилизатор, циклон, абсорбер, в котором распыливают известковое молоко, узел подачи реагентов для улавливания диоксинов, фуранов и ртути, рукавный фильтр и дымосос.

Основной объем исследований на МСЗ № 4 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 (с размерами более 50 мм), в первую очередь металлических фрагментов, в слой, могут вызвать его шлакование, которое приводит к продолжительному останову всей энерготехнологической установки.

В результате специально проведенных опытов с различным распределением первичного воздуха по зонам воздухоподогревающей решетки удалось обеспечить наличие выраженных парных вихревых зон в слое и улучшить перемешивание ТБО и выгрузку материала слоя. Дальнейшие исследования, связанные с варьированием расхода первичного воздуха, выявили закономер-



ности влияния этого расхода на тепловыделение в нижней части топки и рост за счет этого температуры слоя, эффективность реализованного двухступенчатого сжигания, потери наполнителя слоя (песка) с уносом. По их результатам был определен диапазон возможных отклонений расхода первичного воздуха от номинального и разработаны рекомендации по корректирующим мероприятиям в случае возможных технологических нарушений.

Значительный объем выполненных исследований был направлен на обеспечение надежной работы контура внешней циркуляции материала слоя. Удалось установить экспериментальное соотношение между производительностью установки, зольностью отходов и частотой вращения шнеков выгрузки. Например, при сжигании 16 т/ч отходов с зольностью примерно 30 % оптимальная частота вращения этих шнеков должна составлять 13...14 об/мин. (рис. 5). В этом случае из топки выгружается около 20 т/ч материала: примерно 3...4 т/ч в виде шлака (зола слоя) выводится наружу, а остальной материал (более 80 %) возвращается в слой.

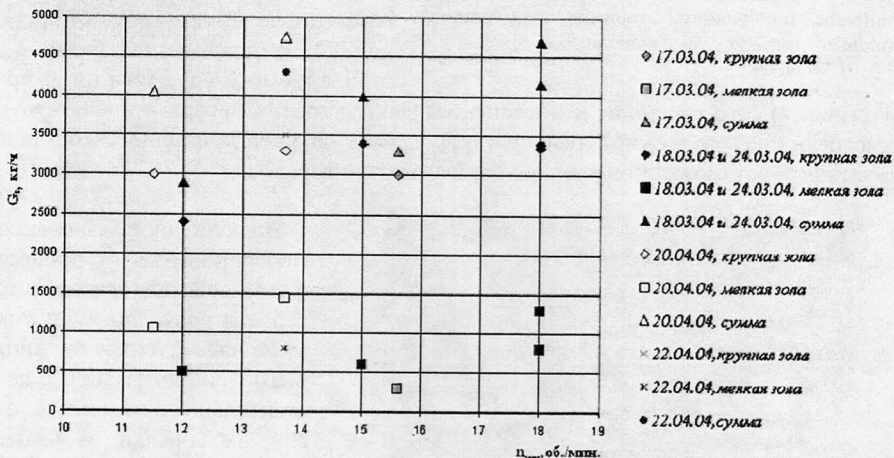


Рис. 5 – Зависимость расхода выгрузки инертного материала из топки от скорости вращения шнеков

Определены тепловые потери, связанные с циркуляцией материала слоя (рис. 6), снижающие тепловую эффективность установки (КПД) примерно на 2 %.

Большой объем исследовательских работ был выполнен для определения допустимых температур в зоне кипящего слоя и оценки эффективности возможных мероприятий по регулированию этих температур.

Установлено, что при температуре выше 700 °С велика вероятность шлакования слоя и интенсивного образования отложений на стенах топки, а сжигание отходов при температуре менее 550 °С происходит с неполным сгоранием отдельных компонентов ТБО, что в конечном итоге вызывает завал пода топки непрогоревшими отходами.



Рис. 6 – Структура тепловых потерь в контуре внешней циркуляции материала слоя (Общие тепловые потери в контуре составляют 0,37...0,54 МВт)

зур (рис. 7). Это приводит к отклонению факела горелки вверх и препятствует разогреву слоя до нужной температуры. В ряде случаев приходилось останавливать всю установку для расшлаковки амбразур горелок.

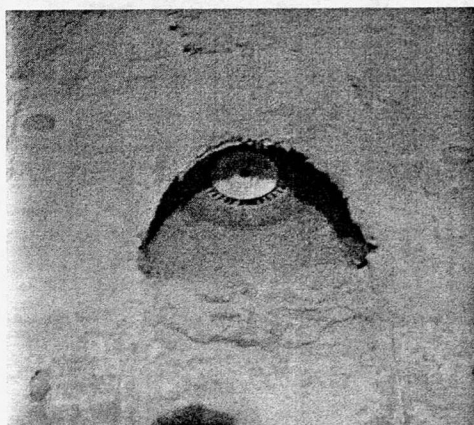


Рис. 7 – Шлакование амбразур горелок, расположенных в районе кипящего слоя

На рис. 8 показано поле скоростей в горелке при умеренной (характерной для режимов поддержания температуры слоя) производительности горелки. На нем отчетливо видна зона рециркуляции в устье горелки.

Исследована возможность регулирования температуры слоя путем сжигания дополнительного топлива в специальных горелках (см. поз. 7, рис. 4), размещенных в зоне кипящего слоя и первоначально предназначенных для растопки топки и поддержания температурного режима при отключении подачи ТБО (например, во время очистки вибросита).

Основная проблема использования таких горелок для регулирования температуры слоя заключалась в том, что при работе на низких нагрузках с течением времени происходит интенсивное шлакование и забивание нижней части их амбразур

Выполненное численное моделирование процесса взаимодействия факела в горелке и восходящего потока материала вихревого кипящего слоя показало, что действительно при малых нагрузках горелки в нижней части амбразуры формируется рециркуляционная зона, в которую попадают частицы из топки и сепарируются на нижний скат амбразуры горелки. Механизм формирования зоны связан в основном с отрывом факела от нижней стенки горелки.

По результатам численного моделирования разработан проект реконструкции амбразуры горелки, который был реализован на всех трех установках. В ходе последующей эксплуатации шлакование амбразур горелок наблюдалось существенно реже.

Еще одним важным итогом исследований технологии сжигания в вихревом кипящем слое является полученная количественная оценка образующихся золошлаковых остатков и их перераспределение между шлаком (золой слоя) и золой-уноса по тракту установки (рис. 9).

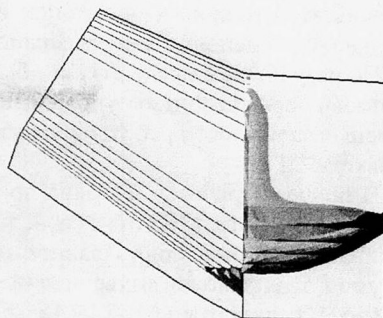


Рис. 8 – Исоповерхность скорости в горелке ( $U=0$ ). Расход газа на горелку составляет 10 % максимального

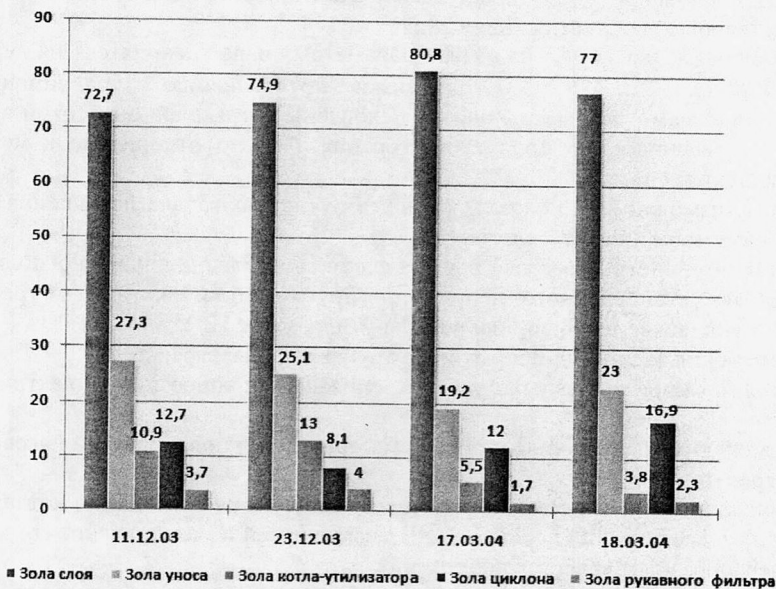


Рис. 9 – Результаты балансовых опытов по определению доли образующихся шлака (золы слоя) и золы-уноса и ее улавливанию по тракту установки, %

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 % общего количества золошлаковых остатков, большая ее часть оседает в котле-утилизаторе и циклоне (более 85 % общего количества летучей золы).

Эти обстоятельства учитывались при сведении теплового баланса и анализе

результатов тепловых испытаний и при разработке мероприятий, связанных с дальнейшим использованием золошлаковых остатков.

По результатам исследований были разработаны новые и внесены изменения в имевшиеся алгоритмы управления процессом сжигания, что значительно повысило надежность работы топки и в целом всей энерготехнологической установки МСЗ № 4.

В процессе работы показана принципиальная возможность увеличения производительности МСЗ № 2 и 4, что в дальнейшем позволило подготовить и принять Постановления Правительства Москвы и выполнить проекты реконструкции этих заводов с увеличением производительности МСЗ № 2 со 130 до 180 тыс. тонн в год и МСЗ № 4 с 250 до 280 тыс. тонн в год.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований в обоснование возможности увеличения энергетической эффективности ТЭС на ТБО за счет повышения параметров пара. Показано, поскольку КПД современных котлов близок к своему предельному значению, этот путь является наиболее действенным для достижения цели.

На большинстве ТЭС на ТБО параметры пара находятся на уровне 1,3...4,0 МПа, 320...420 °С. Столь низкие по сравнению с традиционными энергоустановками параметры пара обусловлены чрезвычайно высокой коррозионной агрессивностью продуктов сгорания ТБО по отношению к металлу труб пароперегревателя.

Анализ возможностей показал, что в этих условиях задача повышения параметров пара может решаться путем:

- дополнительного перегрева пара за счет использования выносного пароперегревателя, установленного, например, в другом котле, сжигающем традиционное органическое топливо, или в котле-утилизаторе ПГУ;
- применения защитных покрытий на трубах пароперегревателя;
- использования топливных присадок, снижающих коррозионную активность продуктов сгорания;
- применения коррозионно-стойкого материала для поверхностей нагрева пароперегревателя.

Выполнена оценка эффективности и возможности реализации на котлах отечественных ТЭС на ТБО перечисленных выше путей и установлено, что наиболее целесообразным является последний.

Выбор приоритетных сталей осуществлялся на основании результатов экспериментальных стендовых исследований и ресурсных промышленных испытаний, выполненных Зеликовым Е. Н. под руководством соискателя. Для исследования были выбраны следующие марки котельных сталей: Сталь 20, 09Г2С, 15ГС, 12ХМ, 15ХМ, 12Х1МФ, ДИ82, ДИ59, 08Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 16Мо3 и P235GH. (Из двух последних изготавливают трубы пароперегревателей для зарубежных котлов, сжигающих ТБО). Исследования в таком объеме в России проводились впервые.

На экспериментальном стенде коррозионно-агрессивные условия моделировались путем поддержания заданного состава газовой среды и нанесением на поверхность образцов золовых отложений, отобранных на МСЗ № 4. Для оценки коррозионной стойкости для всех сталей был выбран весовой метод (определение потери массы образцов в процессе испытаний). Для некоторых образцов применялся также метод непосредственного измерения глубины коррозии.

Результатами стендовых испытаний установлено, что в газовой среде с содержанием HCl до 300 мг/м<sup>3</sup> при температуре поверхности металла 450 °С (без отложения) скорость высокотемпературной газовой коррозии значительно возрастает (до 35 раз) по сравнению со скоростью коррозии на воздухе в аналогичных температурных условиях. Наличие на поверхности металла хлорсодержащих отложений резко увеличивает скорость коррозии (от 3 до 15 раз) по сравнению со скоростью коррозии в газовой среде с таким же содержанием HCl, но без отложений.

В интервале 100...300 ч продолжительность испытаний практически не влияет на скорость общей коррозии для всех исследованных марок сталей, за исключением стали Ди 59. При этом скорость общей коррозии углеродистых (Сталь 20), перлитных и мартенситно-ферритных (09Г2С, 15ГС, 12ХМ, 15ХМ, 12Х1МФ, ДИ 82, 16Мо3 и P235GH) сталей значительно выше, чем сталей аустенитного класса (08Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, ДИ 59) (рис. 10).

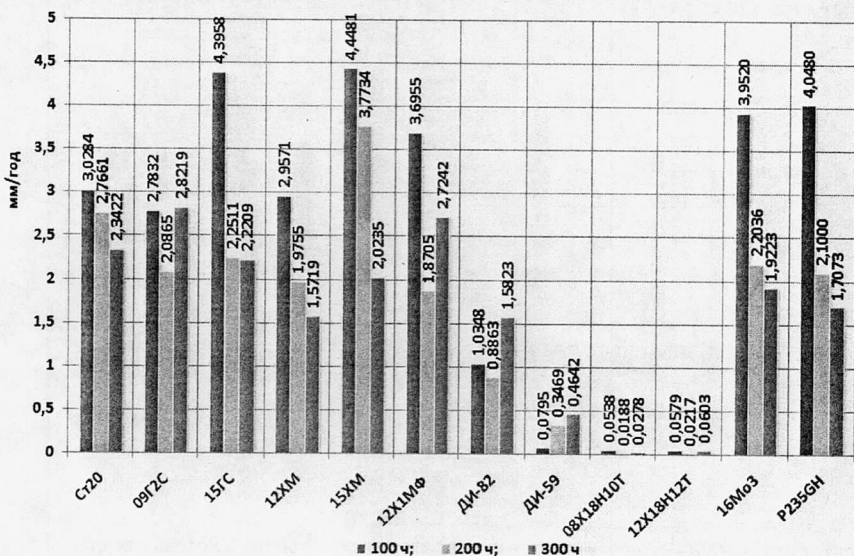


Рис. 10 – Влияние продолжительности испытаний на скорость общей коррозии (мм/г) по результатам стендовых испытаний в газовой среде ( $t = 440..450$  °С;  $C_{O_2} = 11,8$  %,  $C_{H_2O} = 16,8$  %;  $C_{HCl} = 273,2$  мг/м<sup>3</sup>; под слоем отложений с содержанием хлоридов  $C_{Cl}^{m} = 10,8$  %)

Визуальный осмотр образцов после испытаний показал, что на поверхности углеродистых, перлитных и мартенситно-ферритных сталей оксидная пленка полностью отсутствует. На поверхности образцов из аустенитных сталей оксидная пленка в той или иной мере частично сохраняется. Тем не менее, прослеживается тенденция ее безвозвратного разрушения, что вызывает увеличение скорости общей коррозии. В интервале 100...300 ч наиболее наглядно это проявляется для стали ДИ 59 (рис. 10).

Исходя из того, что на поверхности образцов оксидная пленка полностью отсутствует или, в конце концов, будет разрушена, и с учетом того, что продукты коррозии имеют рыхлую неоднородную структуру, сделано предположение, что скорость коррозионных процессов определяется в большей мере интенсивностью физико-химических реакций. Тогда кинетический закон протекания рассматриваемой коррозии для всех исследованных сталей должен быть близок к линейному. Это предположение подтверждают результаты промышленных ресурсных испытаний, которые были выполнены на котле-утилизаторе МСЗ № 4. Образцы сталей были установлены в зоне температур 450...500 °С и 250...300 °С.

Результаты промышленных испытаний также показали, что как и в зарубежных исследованиях, при температуре металла до 450 °С не прослеживается однозначной связи между уровнем легирования и коррозионной стойкостью котельных сталей (рис. 11).

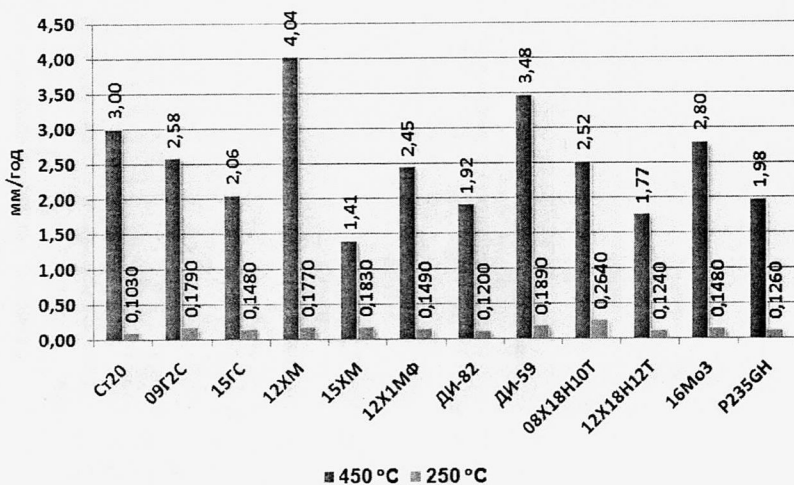


Рис. 11 – Результаты промышленных коррозионных испытаний котельных сталей длительностью 1700 ч при температуре поверхности металла 450 и 250 °С

При температуре поверхности металла 450 °С скорость коррозии высоколегированных аустенитных сталей (12Х18Н12Т, 08Х18Н10Т, ДИ59) находится в диапазоне 1,77...3,48 мм/год, а для перлитных, углеродистых и мартенситно-

ферритных сталей – 1,41...4,04 мм/год. При температуре поверхности металла 250 °С скорость коррозии: для высоколегированных аустенитных сталей – 0,12...0,26 мм/год; для перлитных, углеродистых и мартенситно-ферритных – 0,1...0,18 мм/год.

На основании анализа и обобщения результатов стендовых и промышленных ресурсных испытаний предложена количественная зависимость глубины коррозии от температуры поверхности металла и продолжительности эксплуатации  $\Delta S = f(T, \tau)$ . Для расчета такой характеристики применялся параметрический метод, основанный на законе Аррениуса:

$$\Delta S^n = K_0 \cdot e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \cdot \tau,$$

где  $\Delta S$  – глубина коррозии;  $n$  – показатель параболы в кинетическом законе окисления;  $K_0$  – константа, характеризующая данную сталь и коррозионную среду;  $Q$  – кажущаяся энергия активации процесса, Дж/моль;  $T$  – абсолютная температура, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $\tau$  – продолжительность, ч.

По результатам обработки полученных экспериментальных данных эта зависимость  $\Delta S = f(T, \tau)$  была преобразована в следующий вид:

$$\ln(\Delta S) = a + \ln(\tau) - \frac{b}{T},$$

где  $a, b$  – эмпирические константы, значения которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Эмпирические константы для определения глубины коррозии котельных сталей в среде продуктов сгорания ТБО**

| Марка стали          | a      | b    |
|----------------------|--------|------|
| Сталь 20             | 0,68   | 6300 |
| 09Г2С                | - 1,02 | 5115 |
| 15ГС                 | - 1,31 | 5070 |
| 12ХМ, 15ХМ, 12Х1МФ   | - 0,87 | 5250 |
| ДИ 82 (10Х9МФБ-Ш)    | - 2,14 | 4745 |
| 08Х18Н10Т, 12Х18Н12Т | - 2,04 | 4545 |
| 16Мо3                | - 0,78 | 5340 |
| P235GH               | - 1,1  | 5260 |

Полученная зависимость позволяет в первом приближении оценивать ресурс и межремонтный период пароперегревателя котлов, сжигающих ТБО среднего состава (см. гл. 2), в диапазоне температур наружной поверхности трубы 250...500 °С. Это в свою очередь позволит снизить внеплановые остановки котлов по причине выхода из строя труб пароперегревателей, а также выбрать марку стали для поверхностей нагрева в процессе проектирования новых котлов.

Представлены также практические рекомендации по проектированию пароперегревателей для работы в среде продуктов сгорания ТБО, которые в сочетании с надлежащим выбором материала дают возможность повысить параметры пара до мирового уровня и увеличить срок службы пароперегревателя. К тако-

вым относятся: использование многоступенчатой компоновки пароперегревателя с выбором марки котельной стали для каждой из ступеней; создание конструкции котла, обеспечивающей возможность замены ресурсопределяющей ступени пароперегревателя в рамках текущего ремонта с минимальными затратами; использование новых средств очистки от отложений (например, ультразвуковой) и т. д.

В пятой главе приводятся результаты исследований в обоснование технических решений, принятых по системе очистки газообразных продуктов сгорания ТБО от вредных выбросов.

Защита атмосферного воздуха – одна из наиболее актуальных задач, решение которой, как показывает мировой опыт, во многом определяет перспективы развития электростанций, использующих ТБО в качестве топлива. Как правило, нормативы по выбросам для ТЭС на ТБО более жесткие, чем принятые, например, в России для электростанций, работающих на органическом твердом топливе (табл. 4).

Таблица 4

Нормативные выбросы загрязняющих веществ с уходящими газами энергетических установок, сжигающих ТБО и органическое твердое топливо, мг/м<sup>3</sup>

| Наименование   | Установки, сжигающие ТБО |                    | Энергетические установки для сжигания твердых топлив*** |
|--|--------------------------|--------------------|---|
|  | средне-суточные          | средне-получасовые |   |
| Твердые частицы                                      | 10                       | 30                 | 100...165   |
| Монооксид углерода                                   | 50                       | 100                | 200...260   |
| Оксиды азота (NO <sub>x</sub> )                      | 200                      | 400                | 200...420   |
| Оксиды серы (SO <sub>x</sub> )                       | 50                       | 200                | 800...920   |
| Хлористый водород                                    | 10                       | 60                 | Не нормируется  |
| Фтористый водород                                    | 1                        | 4                  | То же   |
| Тяжелые металлы:                                     | Среднее по пробам        |                    | —//—  |
| Ртуть (Hg)   | 0,05                     |                    |   |
| Кадмий, таллий: Cd, Tl                               | 0,05                     |                    |   |
| Суммарно другие: (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V) | 0,5                      |                    |   |
| ПХДД/ПХДФ**  | 0,1 нг ЭТ/м <sup>3</sup> |                    | —//—  |

\* Величины приведены для сухих газов, приведенных к стандартным условиям (температура – 273,15 К, давление – 101,3 кПа, концентрация O<sub>2</sub> – 11 %).

\*\* В пересчете на токсичный эквивалент 2, 3, 7, 8 – ТХДД (ЭТ).

\*\*\* ГОСТ 50831–95, в пересчете на α = 2,0 для котлов паропроизводительностью до 320 т/ч.

Результаты выполненного аналитического обзора существующих методов и технологий очистки газообразных продуктов сгорания ТБО показывают, что практически невозможно организовать одновременное снижение выбросов всех основных регламентируемых показателей вредных веществ в рамках какого-либо одного метода или на одной технологической стадии. Поэтому на современных установках проблема защиты атмосферного воздуха решается комплексно, путем внедрения нескольких природоохранных методов и мероприя-



тий, реализуемых на разных стадиях технологического процесса термической переработки ТБО.

Очевидно, что выбор газоочистного оборудования определяется составом дымовых газов на выходе из котла, которые в свою очередь зависят как от характеристик самих отходов и организации их сжигания в топке, так и от процессов, происходящих при охлаждении дымовых газов при их прохождении через котел-утилизатор. Поэтому важно знать не только содержание, например, серы, хлора и других веществ в исходных ТБО (такие данные для отходов г. Москвы приведены во второй главе диссертации), но и оценить связывание этих веществ в топке и котле-утилизаторе.

С этой целью на МСЗ № 2 и 4 были выполнены исследования динамики выхода соединений Cl, S и F по тракту: топка – котел-утилизатор – газоочистное оборудование. По данным испытаний и результатам выполненных расчетов установлено, что за счет содержания в минеральной части ТБО таких элементов, как кальций, калий и натрий, в топке и котле-утилизаторе связываются практически вся сера, по крайней мере, 20...26 % хлора и 27...29 % фтора (табл. 5).

Таблица 5

**Результаты расчёта выхода серы, хлора и фтора с твердыми и газообразными продуктами термической переработки ТБО (в % от исходного содержания)**

| Показатель                  | МСЗ №2                    |                 | МСЗ №4            |                   |                   |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                             | Ноябрь-декабрь<br>1999 г. | Март<br>2006 г. | 11/ХІІ<br>2003 г. | 17/ІІІ<br>2004 г. | 26/VIІ<br>2004 г. |
| <b>Выход серы:</b>          |                           |                 |                   |                   |                   |
| со шлаком из топки          | 84,6...86,9               | 76,5            | 68,6              | 40,7              | 62,1              |
| с уловленной золой-уноса    | 1,5...3,2                 | 9,7             | 24,8              | 46,3              | 21,7              |
| с золой РФ и абсорбера      | 11,6...12,2               | 13,8            | 6,6               | 10,9              | 16,2              |
| с уходящими дымовыми газами | 0,03                      | 0,05            | –                 | 2,1               | –                 |
| <b>Выход хлора:</b>         |                           |                 |                   |                   |                   |
| со шлаком из топки          | 18,3...21,6               | 14,7            | 17,5              | 25,9              | 12,1              |
| с уловленной золой-уноса    | 2,0...5,8                 | 5,7             | 27,5              | 35,4              | 15                |
| с золой РФ и абсорбера      | 74,6...75,5               | 78,3            | 33,1              | 28,5              | 71,8              |
| с уходящими дымовыми газами | 0,9...1,3                 | 1,3             | 21,9              | 10,2              | 1,1               |
| <b>Выход фтора:</b>         |                           |                 |                   |                   |                   |
| со шлаком из топки          | 27,2...28,2               | 24,7            | Не определялся    |                   |                   |
| с уловленной золой-уноса    | 0,3...0,8                 | 1,0             |                   |                   |                   |
| с золой РФ и абсорбера      | 2,4...3,0                 | 2,6             |                   |                   |                   |
| с уходящими дымовыми газами | 68,5...69,6               | 71,7            |                   |                   |                   |

Таким образом, можно утверждать, что на выходе из котла в газовой фазе содержится не более 15 % соединений привнесенной с ТБО серы (SO<sub>2</sub>), примерно 80 % хлора (HCl) и 75 % фтора (HF). В этом случае предельные расчетные концентрации регламентируемых «кислых» газов (SO<sub>2</sub>, HCl, HF) для отечественных ТБО не превысят соответственно 220, 300 и 15 мг/м<sup>3</sup>.

Практическая ценность полученных данных заключается в том, что при таких исходных концентрациях SO<sub>2</sub>, HCl и HF в дымовых газах после котла для дальнейшего снижения содержания этих «кислых» газов был предложен сорб-

ционный метод: ввод реагента (соединений кальция или бикарбоната натрия) либо непосредственно в газоход в сухом распыленном виде, либо в абсорбер в виде известкового молока до полного его испарения, в обоих случаях с последующей фильтрацией твердых частиц в рукавном фильтре. В отличие от мокрого метода, который в ряде случаев применяется на зарубежных ТЭС, сжигающих ТБО, очистка дымовых газов с использованием сорбционного метода намного дешевле и не приводит к образованию жидких стоков.

На начальном этапе в обоснование предлагаемого метода была проведена серия опытов по исследованию процессов сухой сорбции на небольшой энерготехнологической установке Череповецкого завода для комплексной переработки ТБО (производительностью 1,5 т/ч). В качестве сорбента были использованы бикарбонат натрия и оксид кальция (последний в свою очередь является отходом металлургического комбината). В результате были достигнуты среднесуточные концентрации  $\text{HCl}$  и  $\text{SO}_2$  в дымовых газах на уровне 12...14  $\text{мг/м}^3$  и 30...35  $\text{мг/м}^3$ , приемлемом, по крайней мере, для небольших (1...5 т/ч по ТБО) установок. Недостатком метода сухой сорбции является низкая степень использования сорбента (около 10 %). Это было учтено при проектировании газоочистки завода «Термоэкология» в г. Челябинске, которая включает в себя циклон, увлажнитель, узел подачи в дымовые газы измельченного сухого реагента и роторный зернисто-волоконистый фильтр – все оборудование отечественной поставки. В системе применена рециркуляция золы роторного фильтра, в которой содержится значительное количество непрореагировавшего гидрооксида кальция. Зола подмешивается к свежему сорбенту, и тем самым повышается степень его использования. (На технологию получено свидетельство на полезную модель).

Эффективность применения полусухого метода для связывания «кислых» газов (смешение в распылительном абсорбере дымовых газов с известковым молоком до полного его испарения) исследовалась на МСЗ № 4. В результате испытаний показано, что концентрация «кислых» газов гарантировано снижается до нормируемых значений во всем диапазоне изменения содержания  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  и  $\text{HF}$  на входе в газоочистку.

Основная проблема, с которой пришлось столкнуться при использовании полусухого метода на МСЗ № 4, – рост отложений на стенках распылительного абсорбера, их обрушение и, как следствие, останов всей энерготехнологической установки для их удаления. Расчетная скорость роста этих отложений составляла примерно 0,5 мм/ч, то есть в абсорбере за месяц его работы образовывались отложения толщиной до 300 мм и общей массой до 25...35 т. С использованием математического моделирования установлено, что основная причина этого связана с тем, что поток газов отбрасывается к стенке абсорбера и вдоль нее опускается вниз к выходному газоходу (рис. 12, а).

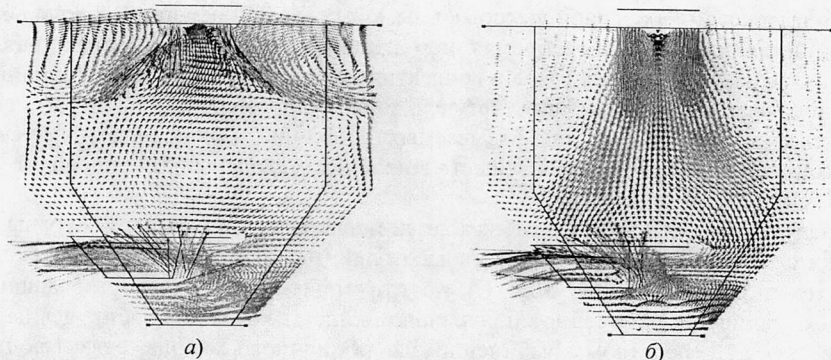


Рис. 12 – Распределение дымовых газов в абсорбере при существующей (а) и реконструированной (б) форме патрубка входа дымовых газов

Чтобы улучшить распределение дымовых газов на входе в абсорбер и тем самым уменьшить рост отложений, разработаны рекомендации по реконструкции ввода дымовых газов в абсорбер путем изменения угла наклона лопаток. Выполнение входа дымовых газов в абсорбер в виде диффузора, расширяющегося под углом  $6^\circ$ , с направляющими лопатками, расположенными под углом  $70^\circ$ , существенно улучшает равномерность распределения дымовых газов в абсорбере (рис. 12, б) и замедляет процесс образования отложений на его стенках.

Рассматриваются также вопросы образования  $\text{NO}_x$  и способы их подавления. Показано, что на современных установках при сжигании твердых бытовых отходов в основном образуются топливные  $\text{NO}_x$ , количество которых в первую очередь зависит от содержания азота в исходных ТБО (в отходах г. Москвы  $N^r = 0,3 \dots 0,4 \%$ ).

За счет топочных мероприятий, например, на МСЗ № 4 путем перераспределения вторичного воздуха, удается обеспечить концентрацию  $\text{NO}_x$  в дымовых газах на уровне  $180 \dots 200 \text{ мг/м}^3$ , что удовлетворяет современным мировым требованиям. Если в силу каких-то причин, например из-за большой фоновой концентрации  $\text{NO}_x$  в зоне размещения ТЭС, требуется дополнительное снижение их эмиссии, то применяют методы селективного восстановления  $\text{NO}_x$ .

За рубежом наибольшее распространение на котлах, сжигающих ТБО, получили технологии селективного некаталитического восстановления  $\text{NO}_x$  (СНКВ). Это объясняется тем, что в этих котлах имеется зона, в которой дымовые газы выдерживаются в течение 2 с и более при температуре  $850 \dots 900^\circ\text{C}$  (для деструкции ПХДД/ПХДФ). Эти условия (температура и время) являются оптимальными для применения технологии СНКВ. Многолетний опыт эксплуатации системы СНКВ, установленной на МСЗ № 2, показал возможность очистки дымовых газов от  $\text{NO}_x$  с эффективностью  $60 \dots 70 \%$ .

Большое внимание в работе уделяется образованию при сжигании ТБО ПХДД/ПХДФ и методам снижения их концентрации в газообразных продуктах сжигания до регламентируемых значений. Известно, что за счет упомянутой

выше высокотемпературной выдержки дымовых газов в первом газоходе котла достигается практически требуемая нормативная концентрация. Однако на стадии охлаждения дымовых газов в конвективных газоходах котла под влиянием каталитических составляющих летучей золы, например хлоридов металлов, происходит образование так называемых вторичных диоксинов и фуранов. Снижение концентрации этих веществ в продуктах сгорания ТБО проводят уже в системе газоочистки.

Следует отметить, что в дымовых газах после котла диоксины и фураны содержатся в виде тончайших твёрдых аэрозолей (например, температура плавления тетра-ХДД составляет 305 °С), поэтому примерно 95 % образовавшихся при сжигании ТБО диоксинов и фуранов покидают котёл, адсорбируясь на летучей золе. Посредством комбинации адсорбционного метода, связывающего остающиеся в газовой фазе ПХДД/ПХДФ (например, за счёт распыления активированного угля перед рукавным фильтром), и эффективного улавливания твёрдых частиц в рукавном фильтре удаётся добиться требуемой очистки дымовых газов от диоксинов и фуранов. В рамках работы эффективность этого метода в российских условиях была исследована на установке в г. Череповце одновременно с испытаниями по определению эффективности улавливания «кислых» газов с применением сухой сорбции.

Результаты определения концентраций ПХДД/ПХДФ в газообразных продуктах сгорания ТБО, которое выполняла аккредитованная организация ОЦПИ НПО «Тайфун» (г. Обнинск), представлены в табл. 6.

Анализ данных табл. 6 показывает, что степень улавливания из дымовых (уходящих) газов ПХДД (особенно тетра- и пента-ХДД) достигает практически 100 %. Степень улавливания ПХДФ несколько меньше, но общая концентрация диоксинов и фуранов после газоочистки составила менее 0,07 нг/м<sup>3</sup>, что даже для такой небольшой установки вполне удовлетворяет требуемым мировым нормативам.

Полученные положительные результаты позволили с уверенностью прогнозировать эффективность предложенного метода для более крупных установок, где процесс перемешивания активированного угля с дымовыми газами намного эффективнее и время контакта угля с диоксинами и фуранами значительно больше. Это подтвердили измерения концентраций этих веществ в дымовых газах, выполненные Российским научно-исследовательским центром чрезвычайных ситуаций МЗ РФ на МСЗ № 2 и 4.

По результатам выполненных экспериментально-расчетных исследований для очистки образующихся при сжигании ТБО дымовых газов была предложена многоступенчатая система, сочетающая в себе лучшие отечественные и зарубежные технологии, реализованные как на стадии сжигания, так и за котлом. Она позволяет получить даже более низкие показатели, чем приведенные в табл. 4. Описание схемы и оборудования для отечественной ТЭС на ТБО приводится в седьмой главе.

Таблица 6

Результаты определения концентрации токсичных ПХД/ПХДФ в дымовых газах на Череповецком заводе для комплексной переработки ТБО

| Определяемый компонент      | Эквивалент токсичности (ЭТ) | Дымовые газы      |                         |                   |                         |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
|                             |                             | до очистки        |                         | после очистки     |                         |
|                             |                             | Концентрация      |                         |                   |                         |
|                             |                             | пг/м <sup>3</sup> | в ЭТ, пг/м <sup>3</sup> | пг/м <sup>3</sup> | в ЭТ, пг/м <sup>3</sup> |
| 2378-ТХДД                   | 1,0                         | 11,5              | 11,5                    | –                 | –                       |
| 12378-ПеХДД                 | 0,5                         | 55,2              | 27,6                    | –                 | –                       |
| 123478-ГкХДД                | 0,1                         | 142               | 14,2                    | –                 | –                       |
| 123678-ГкХДД                | 0,1                         | 265               | 26,5                    | –                 | –                       |
| 123789-ГкХДД                | 0,1                         | 290               | 29,0                    | –                 | –                       |
| 1234678-ГпХДД               | 0,01                        | 1397              | 13,97                   | 87,8              | 0,878                   |
| ОХДД                        | 0,001                       | 1168              | 1,168                   | 160               | 0,160                   |
| 2378-ТХДФ                   | 0,1                         | 287               | 28,7                    | 34,5              | 3,45                    |
| 12378-ПеХДФ                 | 0,05                        | 58,0              | 2,9                     | 33,7              | 1,685                   |
| 23478-ПеХДФ                 | 0,5                         | 331               | 165,5                   | 91,9              | 45,95                   |
| 123478-ГкХДФ                | 0,1                         | 341               | 34,1                    | 101               | 10,1                    |
| 123678-ГкХДФ                | 0,1                         | 204               | 20,4                    | 31,8              | 3,18                    |
| 123789-ГкХДФ                | 0,1                         | –                 | –                       | –                 | –                       |
| 234678-ГкХДФ                | 0,1                         | 331               | 33,1                    | –                 | –                       |
| 1234678-ГпХДФ               | 0,01                        | 537               | 5,37                    | 191               | 1,91                    |
| 1234789-ГпХДФ               | 0,01                        | 87                | 0,87                    | –                 | –                       |
| ОХДФ                        | 0,001                       | 195               | 0,195                   | 297               | 0,297                   |
| Суммарная концентрация в ЭТ |                             |                   | 415,07                  |                   | 67,61                   |
| Другие ПХДД/Ф*              |                             | 0                 | 12121                   | 0                 | 734                     |

\* Другие ТХДД, ТХДФ, ПеХДД, ПеХДФ, ГкХДД, ГкХДФ, ГпХДД и ГпХДФ, имеющие эквивалент токсичности, равный нулю.

В шестой главе рассказывается об исследовании образующихся при сжигании ТБО твердых остатков и разработке рекомендаций по их дальнейшей утилизации, которые возможно реализовать на территории ТЭС, работающей на ТБО.

В процессе термической переработки ТБО образуются три основных вида твердых остатков: шлак, выгружаемый из топочного устройства (до 90 % по массе от всех твердых остатков); зола-уноса, уловленная в котле и в золоулавливающих аппаратах системы газоочистки до ввода реагентов в поток дымовых газов (10...30 кг/т ТБО); и так называемые продукты газоочистки – смесь твердых продуктов реакций, остатков реагентов и мелкофракционной остаточной летучей золы (25...35 кг/т ТБО).

В ходе работы выполнен анализ вещественного и фракционного (гранулометрического) состава шлака, а также элементного состава его силикатной части. Установлено, что состав шлака во многом зависит от вида сжигаемых ТБО и способа сжигания. При слоевом сжигании на колосниковой решетке (МСЗ № 2) вещественный состав шлака состоит из силикатной части – 79,2...83,8 %, металлических включений – 14,6...20,8 % и мягкой части (несгоревший картон,

полиэтилен, текстиль) – 0...0,8 %. В случае сжигания отходов в вихревом кипящем слое с предварительным измельчением ТБО и удалением металла на стадии их подготовки в шлаке практически отсутствуют органические и металлические включения.

Результаты определения фракционного состава, приведенные в табл. 7, показывают, что шлак МСЗ № 2 является грубодисперсным материалом. Так, 39...44 % его имеют размеры свыше 10 мм, 37...43 % – от 1 до 10 мм и только 16...17 % – от 1 до 0,05 мм. Шлак МСЗ № 4 (зола слоя) имеет более однородную структуру (за счет специфичных условий его удаления с просеиванием и рециркуляцией материала слоя).

Таблица 7

**Гранулометрический состав шлака и золы уноса МСЗ, сжигающих ТБО, масс. %**

| Размер ячейки сит, мкм | Шлак        |                     | Зола-уноса  |               |
|------------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------|
|                        | МСЗ № 2     | МСЗ № 4 (зола слоя) | МСЗ № 2     | МСЗ № 4       |
| 10000                  | 38,7...43,8 | 27,6...30,3         | –           | –             |
| 1000                   | 80,7...81,6 | 52,8...83,8         | 2,2...3,1   | 0...0,08      |
| 630                    | 84,2...85,5 | 85,6...95,5         | 9,1...10,0  | 0...0,16      |
| 400                    | 88,2...89,2 | Не определяли       | 24,7...26,6 | 0...5,9       |
| 315                    | 90,3...91,1 | 98,7...99,0         | 40,3...42,9 | Не определяли |
| 200                    | 92,0...93,3 | 99,4                | 60,7...63,1 | 44,3...51,4   |
| 160                    | 93,3...94,4 | Не определяли       | 70,7...73,2 | Не определяли |
| 90                     | 95,0...95,8 | То же               | 81,1...84   | 71,6...80,8   |
| 63                     | 96,4...97,1 | —//—                | 88,4...90,6 | 78,9...90,2   |
| 50                     | 97,5...97,8 | —//—                | 91,4...93,8 | 81,0...95,2   |
| Дно                    | 100,0       | 100,0               | 100,0       | 100,0         |

Таблица 8

**Элементный состав твердых остатков МСЗ, сжигающих ТБО, масс. %**

| Элементы                       | Шлак       |                     | Зола-уноса         |                    |                         | Продукты газоочистки МСЗ № 4 |
|--------------------------------|------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|
|                                | МСЗ № 2    | МСЗ № 4 (зола слоя) | МСЗ № 2 (после КУ) | МСЗ № 4 (после КУ) | МСЗ № 4 (после циклона) |                              |
| SiO <sub>2</sub>               | 49,7...62  | 81...85,3           | 29...43,2          | 54,9...77          | 19...34,7               | 2,6...29,2                   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,3...0,6  | 0,2...0,4           | 0,9...2,6          | 0,6...0,8          | 1,1...1,4               | 0,4...2,7                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,2...11,8 | 1,4...2,5           | 7,2...13,6         | 4,5...11,1         | 9,2...11,9              | 0,8...13,8                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,1...5,0  | 0,9...2,0           | 1,5...5,9          | 0,7...2,4          | 2,0...2,8               | 0,4...2,2                    |
| CaO                            | 12,5...19  | 5,2...6,8           | 13,8...37          | 10,8...19          | 23,7...33               | 20,5...59,8                  |
| MgO                            | 1,5...2,3  | 0,5...0,7           | 1,5...2,5          | 0,5...1,3          | 2,0...2,9               | 0,7...5,6                    |
| K <sub>2</sub> O               | 0,7...2,0  | 0,5...0,8           | 0,5...4,5          | 0,9...1,4          | 1,6...2,2               | 2,1...12,1                   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,5...10,6 | 3,3...4,5           | 2,2...6,5          | 1,3...2,1          | 2,5...3,1               | 1,2...14,2                   |
| SO <sub>3</sub>                | 2,1...4,9  | 1,2...5,2           | 4,5...8,6          | 1,2...6,5          | 5,5...7,6               | 1,85...12,6                  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1,3...6,7  | 0,6...4,3           | 2,1...6,5          | 0,5...2,1          | 2,9...3,6               | 0,5...3,3                    |
| Cl                             | 0,2...2,3  | 0,2...0,5           | 0,8...2,7          | 0,3...1,4          | 2,7...4,2               | 4,6...18,9                   |

Данные по элементному составу силикатной части шлака МСЗ № 2 (сжигание на обратно-переталкивающей решетке) и золы слоя МСЗ № 4 (сжигание в вихревом кипящем слое) представлены в табл. 8.

Обобщены также данные по свойствам золы-уноса, которые как и для шлака, зависят от состава отходов и способа их сжигания. Гранулометрический и элементный состав золы по результатам исследований, проведенных на МСЗ № 2 и 4, представлен в табл. 7 и 8.

Содержание микроэлементов во всех твердых продуктах сгорания ТБО (шлак, зола) колеблется в пределах, 6000...8100 мг/кг (табл. 9). Превалирующими элементами являются цинк, свинец, медь, марганец, хром и стронций, суммарная доля которых составляет 93...95 % общего содержания микроэлементов. Заметно обогащение золы кадмием, хромом, ртутью, сурьмой и марганцем по сравнению со шлаком.

Таблица 9

**Пределы колебаний содержания микроэлементов в твердых остатках МСЗ, сжигающих ТБО, мг/кг**

| Элементы      | Шлак        |                     | Зола-уноса         |                    |                         | Продукты газо-очистки МСЗ № 4 |
|---------------|-------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------|
|               | МСЗ № 2     | МСЗ № 4 (зола слоя) | МСЗ № 2 (после КУ) | МСЗ № 4 (после КУ) | МСЗ № 4 (после циклона) |                               |
| Ртуть (Hg)    | 0...0,1     | –                   | 0,3                | –                  | 0...0,1                 | 0...1,3                       |
| Кадмий (Cd)   | 0...5,6     | –                   | 50                 | –                  | 25                      | 58...130                      |
| Свинец (Pb)   | 1655...2701 | 215...379           | 146...1100         | 502...816          | 1200...2300             | 1380...10725                  |
| Кобальт (Co)  | 6,7...33    | 17                  | 7...17             | 8...34             | 13...37                 | 6...23                        |
| Хром (Cr)     | 179...181   | 99...140            | 470...870          | 191...304          | 480...690               | 260...1300                    |
| Марганец (Mn) | 332...593   | 180...410           | 800...1000         | 362...1240         | 1309                    | 501...830                     |
| Никель (Ni)   | 26...60     | 13...26             | 47...61            | 34...79            | 90...120                | 64...110                      |
| Мышьяк (As)   | 4...12      | 3...12              | 2,5...10           | <3                 | 3...8,5                 | 5...11                        |
| Сурьма (Sb)   | 26...44     | –                   | 90                 | –                  | 120...190               | 140...390                     |
| Медь (Cu)     | 925...2290  | 529...669           | 370...580          | 1290...2760        | 2600...3200             | 1800...6235                   |
| Ванадий (V)   | 15...16     | 8...19              | 20...27            | 13...16            | 23...32                 | 10...34                       |
| Цинк (Zn)     | 1267...4000 | 547...1130          | 1369...3180        | 2175...3970        | 7900...13100            | 4500...12540                  |
| Стронций (Sr) | 350...672   | 130...337           | 410...530          | 260...470          | 470...900               | 230...1300                    |

С использованием полученных данных была выполнена оценка класса опасности шлака и золы-уноса для окружающей среды, которая показала, что эти отходы в соответствии с действующими нормативами относятся к 4 или даже к 5 классу опасности. Это позволяет рассмотреть возможность их дальнейшей переработки с получением товарной продукции, в том числе на территории ТЭС.

За рубежом в зависимости от свойств ТБО, способа сжигания, конкретных местных условий, потребителя товарного продукта и т. д. на предприятиях, сжигающих твердые бытовые отходы, выбирают ту или иную технологию утилизации шлака и золы-уноса (далее золошлаковых остатков – ЗШО) или в неко-

торых случаях даже разрабатывают новую. Вместе с тем требования к качеству ЗШО для их дальнейшего использования в основном сведены к следующему:

- Доля горючих веществ (содержание несгоревшего углеродистого остатка) не должна превышать 5 % от сухой массы.

- В случае вымывания водой максимально допустимое количество растворенных в воде веществ должно составлять не более 2 % от сухой массы ЗШО.

Выполнение нормативов по содержанию горючих веществ в золошлаковых остатках является определяющим. Следует сказать, что согласно европейским нормативам, их содержание в ЗШО более 5 % существенно ограничивает не только возможность их дальнейшей утилизации, но и вызывает значительные проблемы с вывозом золошлаковых остатков на захоронение.

В этой связи в работе большое внимание уделено определению истинного содержания горючих веществ в ЗШО и предложена оригинальная методика их оценки. Дело в том, что, как показали предварительные испытания на действующем оборудовании, 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 карбонатов кальция с выделением  $\text{CO}_2$ . В табл. 10 показана структура П.п.п. силикатной части шлака (меньше 3 мм), наиболее проблемной и оказывающей определяющее влияние на общее значение этих потерь.

Таблица 10

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 $\text{CaCO}_3$                           | 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 табл. 10 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 %.

В качестве иллюстрации на рис. 13 показана термограмма для случая с максимальным из всех полученных значений П.п.п. (16 %, режим 13.09.02 г. в табл. 10), из которой видно, что П.п.п., связанные с выгоранием горючих веществ, даже в этом случае составляют всего лишь около 5 %.

П.п.п. в пробах ЗШО, образующихся при сжигании ТБО в вихревом кипящем слое, оказались очень низкими. Как показали исследования на МСЗ № 4 в 2003...2004 гг., в шлаке (крупной фракции золы слоя, отводимой из топки) они не обнаружены, в мелкой фракции и циркулирующем материале составляют всего 0,65 и 0,34 % соответственно.



Содержание горючих в золе-уноса по обеим технологиям сжигания также незначительно и не превышает 2 %. Несмотря на то, что при сжигании ТБО в топках с колосниковыми решетками П.п.п. золы-уноса довольно значительны (14...25,6 %), тем не менее основные потери связаны с удалением воды при дегидратации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и алюмосиликатов, а также удалением  $\text{CO}_2$  из карбоната кальция. В табл. 11 для примера приведена расшифровка П.п.п. пробы золы, отобранной на МСЗ № 2 в 2006 г.

В золе-уноса, уловленной в котле-утилизаторе и циклоне, при сжигании ТБО в вихревом кипящем слое (МСЗ № 4) П.п.п. также малы и составляют примерно 1,3 %.

Таким образом, показано, что ЗШО, образующиеся при сжигании ТБО с использованием как технологии слоевого колосникового сжигания, так и технологии вихревого кипящего слоя, удовлетворяют требованиям по содержанию горючих и пригодны для дальнейшей утилизации.

Для снижения содержания легко растворимых компонентов в ЗШО в работе рассмотрены два основных метода: цементация ЗШО с использованием различных связующих и их переплавка.

Метод цементации основан на склонности золошлаковых остатков от сжигания ТБО к самоотвердеванию. Однако лабораторные испытания показали, что прочность отвердевшей смеси недостаточна для самостоятельного использования, например, в строительной индустрии. Для усиления композиции в ЗШО добавлялся цемент с получением шлакоблоков непосредственно на территории ТЭС. На образцах, изготовленных с добавлением песка и цемента марки 400, исследовалось влияние на выщелачивание микроэлементов, для которых существуют ПДК в почве по подвижным формам, т. е. марганца, меди, хрома, свинца, кобальта и никеля. С использованием полученных закономерностей миграций тяжелых металлов из образцов бетонных изделий проведены расчеты, которые показали, что содер-

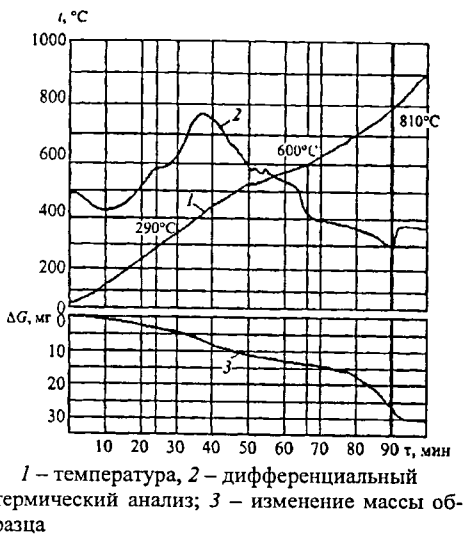


Рис. 13 – Термограмма для определения структуры потерь при прокаливании силикатной части шлака (менее 3 мм), 13.09.2002 г.

Таблица 11  
Структура П.п.п. золы уноса МСЗ № 2

| Наименование  | %, масс. |
|---|----------|
| П.п.п. из-за дегидратации алюмосиликатов и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 9,7      |
| П.п.п за счет разложения $\text{CaCO}_3$                            | 14,0     |
| П.п.п. за счет выгорания горючих веществ                            | 1,9      |
| Общие П.п.п.  | 25,6     |

жание тяжелых металлов в подвижных формах в образцах бетонов значительно ниже (в 2...20 раз) ПДК подвижных форм этих элементов в почве.

Метод переплавки основывается на преобразовании ЗШО путем нагрева до температуры, превышающей температуру плавления, равную приблизительно 1200 °С, в стеклообразный гранулированный материал, удовлетворяющий всем условиям не только для получения, например, щебня для отсыпки дорог, но и для промышленного использования в стройиндустрии. Целесообразность использования переработки ЗШО по методу переплавки на территории ТЭС должна определяться на стадии технико-экономического обоснования.

Твердые продукты газоочистки представляют собой более проблемный по сравнению с ЗШО вид остатков от термической переработки ТБО. По степени опасности продукты газоочистки, как правило, относятся к 3-му классу опасности для окружающей природной среды и требуют более глубокую по сравнению с ЗШО переработку. В этой связи, а также, учитывая то, что твердых продуктов газоочистки образуется в разы меньше, чем, например, шлака, переработку продуктов газоочистки на территории ТЭС осуществлять экономически нецелесообразно. Эта операция должна осуществляться на специализированных предприятиях, на которые будут свозиться аналогичные отходы с других объектов (и не только сжигающих ТБО) и централизованно перерабатываться с утилизацией ценных компонентов, содержащихся в продуктах газоочистки.

Таким образом, в главах 5 и 6 диссертации показано, что все основные проблемы, связанные с воздействием на окружающую среду ТЭС, работающих на ТБО, технически решаемы. Разумный подход к их практической реализации делает современную ТЭС на ТБО экологически безопасным предприятием.

**В седьмой главе** на основании результатов выполненных исследований, а также с учетом зарубежного опыта и современных мировых тенденций в области термической утилизации отходов, разработаны принципиальные технические решения для реализации современной полномасштабной отечественной ТЭС на ТБО с установленной электрической мощностью 24 МВт, предназначенной для широкого применения. Только в России целесообразен уже на первом этапе ввод в эксплуатацию, по крайней мере, 34 таких ТЭС в 22 городах.

По структуре ТЭС на ТБО представляет собой современное предприятие с завершенным технологическим процессом термической переработки отходов и традиционным паросиловым циклом для выработки электроэнергии. Кроме котельно-топочного отделения, основу которого составляют котельный агрегат, газоочистное и вспомогательное оборудование, в состав такой ТЭС входят:

- энергетический комплекс, предназначенный для выработки тепловой и электрической энергии;
- приемное отделение с весовой, помещением для разгрузки мусоровозов и приемным бункером ТБО (аналог топливно-транспортного хозяйства угольной ТЭС);
- водоподготовительная установка с коррекционной обработкой воды;

- отделение сбора, временного хранения и переработки твердых остатков от сжигания;
- система мониторинга газовых выбросов;
- административно-бытовой корпус, склады, стоянки и другие помещения для инженерного обеспечения ТЭС (ГРП, компрессорная, очистные сооружения и т. д.).

Обоснована единичная производительность энерготехнологической установки по сжигаемым отходам, которая для отечественных ТЭС на ТБО составляет примерно 180 тыс. тонн ТБО в год (примерное годовое количество отходов, образующихся в городах с населением 350...400 тыс. чел.). Для типовой ТЭС электрической мощностью 24 МВт, на которой предполагается размещение двух таких энерготехнологических установок, разработан технологический регламент процесса термической утилизации ТБО с выработкой электроэнергии.

Показано, что для ритмичной работы такой ТЭС требуется ежедневная доставка отходов в количестве примерно 1000 т, разгрузка которых осуществляется в специальный бункер, обеспечивающий трехсуточный запас топлива.

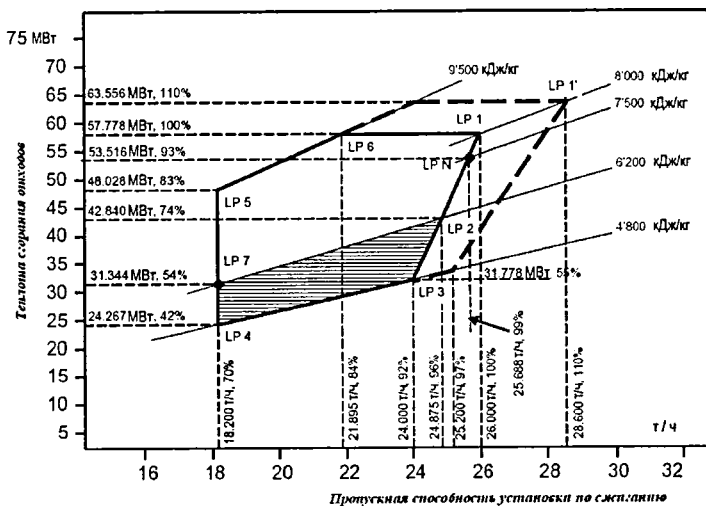
Для подготовки ТБО к сжиганию предложен оригинальный алгоритм управления размещением бытовых отходов в этом бункере, разработанный в результате математического моделирования, суть которого состоит в том, что ТБО распределяются в бункере в виде «бегущей волны», перемещающейся вдоль длинной стороны бункера. Это позволяет разделять отходы по времени их поступления и выдержки, а также обеспечивать хорошее перемешивание ТБО перед загрузкой в котел. Стандартное отклонение теплоты сгорания ТБО в каждой порции загружаемых отходов от среднего значения в бункере составляет в зависимости от наполнения бункера от 4,3 до 11 %.

Для проектируемой энерготехнологической установки разработана диаграмма мощности, которая приведена на рис. 14.

Видно, что энерготехнологическая установка способна утилизировать ТБО в широком диапазоне изменения удельной теплоты сгорания, в том числе, с учетом современной тенденции ее увеличения (вплоть до 9500 кДж/кг) без снижения проектной производительности установки. Использование ТБО с низкой теплотой сгорания обеспечивается за счет сжигания дополнительного топлива в газовых горелках, а также подогрева дутьевого воздуха при необходимости до 300 °С в газовом воздухоподогревателе оригинальной конструкции.

Учитывая многолетний опыт эксплуатации московских заводов и результатов выполненных испытаний, сформулированы основные критерии выбора и требования к проектированию основного и вспомогательного оборудования котельно-топочного отделения.

Для снижения концентраций вредных примесей в дымовых газах предлагается многоступенчатая система газоочистки, основу которой составляет полусухой метод с применением многократной циркуляции увлажненных реагентов и продуктов газоочистки, частично возвращенных в процесс после их улавливания в рукавном фильтре.



- область длительной работы;
- область возможной работы с кратковременной перегрузкой;
- область работы с применением вспомогательного топлива

Рис. 14 – Диаграмма мощности энерготехнологической установки с наклонно-переталкивающей решеткой номинальной производительностью 24 тонны ТБО в час

Разработана тепловая схема ТЭС, выполненная с поперечными связями и двумя конденсационными турбинами с регулируемым отбором пара на теплофикацию. В зависимости от времени года и запроса потребителей энергии, ТЭС позволяет вырабатывать от 10 до 24 МВт электрической и от 2,4 до 8 ГДж/ч тепловой энергии. Тепловая схема предусматривает возможность удержания в работе котлов в случае внепланового отключения паровой турбины с подводом пара в конденсатор турбины.

В качестве конденсатора предложена воздушно-конденсационная установка (ВКУ), которая в условиях городской застройки является наиболее целесообразным решением в экономическом и экологическом отношении. В обоснование этого решения приводится обобщение результатов испытаний ВКУ, установленной на МСЗ № 2. Разработанные технические предложения по повышению ее надежности в период отрицательных температур частично реализованы в настоящее время на МСЗ № 2. Сформулированы технические требования к перспективной конструкции ВКУ.

Результаты расчета материального и теплового баланса ТЭС на ТБО, выполненного для отходов с различными характеристиками во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок, обосновывают проектные технико-экономические и экологические показатели электростанции.

В этой главе также сформулированы основные требования к АСУТП ТЭС на ТБО.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны технологические основы комплексных процессов экологически безопасной термической утилизации ТБО с выработкой энергии, на основании которых разработан профиль отечественной ТЭС на ТБО с показателями энергоэффективности, соответствующими мировым стандартам.

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Показано, что сжигание несортированных ТБО с энергетической утилизацией образующегося тепла является экономически приемлемым способом цивилизованного решения важнейшей социальной задачи – санитарной очистки крупных городов от отходов.

2. В ходе работы исследованы теплотехнические характеристики ТБО, поступающих на отечественные предприятия для энергетической утилизации. Для них характерны влажность 30...45 %, зольность 40...50 %, низшая теплота сгорания 5...8,5 МДж/кг (на горючую массу 20...23 МДж/кг). Определены морфологический и элементный состав ТБО и пределы их изменений.

Для проведения исследования разработана оригинальная методика, прошедшая апробацию и оформленная стандартом ВТИ.

3. Исследованы процессы сжигания ТБО в слое на механических колосниковых решетках и в вихревом кипящем слое. Для обеих технологий определены условия полного сгорания ТБО, выяснены и решены вызывающие затруднения проблемы. Получены зависимости полноты сгорания, шлакования, образования  $\text{NO}_x$  и «кислых» газов от различных параметров (температуры и избытка воздуха, характеристик ТБО). Установлены пределы изменения распределения расходов воздуха, температуры слоя и работы контура внешней циркуляции, при которых обеспечивается нормальная работа топки с вихревым кипящим слоем и показано, что отклонение за эти пределы, а также накопление в слое крупных материалов могут вызвать шлакование в топке, делающее ее дальнейшую работу невозможной. Полученные закономерности и разработанные на их основе мероприятия обеспечили длительную эксплуатацию топок с обеими технологиями и снизили образование вредных веществ в дымовых газах и содержание горючих в золошлаках.

4. Разработана концепция защиты атмосферы от вредных выбросов ТЭС на ТБО, включающая технологические мероприятия и многоступенчатую очистку газов. Исследованы характеристики отдельных ступеней очистки: золоуловителей, устройств очистки от  $\text{NO}_x$ , «кислых» газов, диоксинов и фуранов при работе на продуктах сгорания ТБО. В частности, было установлено:

- при сжигании ТБО ( $N^r = 0,3...0,4$  %) концентрация  $\text{NO}_x$  в дымовых газах из котла находится на уровне 180...200 мг/н<sup>3</sup> (в основном за счет топливных  $\text{NO}_x$ ). Применяя топочные мероприятия ее можно уменьшить. Например, на МСЗ № 4 путем перераспределения вторичного воздуха выбросы  $\text{NO}_x$  удалось снизить на 15 %;

- применение СНКВ позволяет уменьшить выбросы  $\text{NO}_x$  на 60...70 %;

- за счет содержания в минеральной части ТБО таких элементов, как кальций, калий и натрий, в топке и котле-утилизаторе связываются практически вся сера, до 20...26 % хлора и 27...29 % фтора;

- степень улавливания из дымовых (уходящих) газов ПХДД (особенно тетра- и пента-ХДД) достигает практически 100 %. Степень улавливания ПХДФ несколько меньше, тем не менее общая концентрация диоксинов и фуранов после газоочистки в полной мере удовлетворяет требуемым мировым нормативам.

Выявленные закономерности и разработанные на их основе мероприятия позволили обеспечить при регулярной эксплуатации допустимые выбросы по всем регламентируемым компонентам.

5. Зола и шлаки, образующиеся при сжигании ТБО, не токсичны. Исследования, выполненные с использованием принятых в России методик, позволяют отнести их к 4 или даже 5 классу опасности и использовать для приготовления шлакоблоков или в дорожном строительстве.

Твердые продукты газоочистки, количество которых невелико, относятся к 3-му классу опасности и подлежат переработке на специальных предприятиях.

6. Тепловая экономичность отечественных ТЭС на ТБО невысока (их КПД в конденсационном режиме составляет 15...16 %), главным образом, из-за низких параметров пара, ограниченных вследствие высокой коррозионной активности продуктов сгорания ТБО. Показана возможность повышения параметров пара и КПД ТЭС путем рационального выбора материала труб и конструкции пароперегревателей котлов. Установлено, что надежность пароперегревателя при увеличении перегрева пара до 400 °С при давлении 4,0 МПа (по сравнению с существующими 320 °С и 1,3 МПа) может быть обеспечена за счет использования материалов, более стойких к специфической коррозии в среде продуктов сгорания ТБО, и конструктивным исполнением поверхности, снижающим негативное влияние коррозии. Как показали стендовые и промышленные испытания, при температурах наружной поверхности стенки трубы 400...500 °С наиболее устойчивыми к такой высокотемпературной коррозии являются котельные стали 12Х18Н12Т и ДИ82.

7. Результаты выполненных исследований использованы при освоении в эксплуатации отечественных ТЭС на ТБО для обеспечения их регулярной работы с требуемыми надежностью и экологическими показателями. Они явились также основой для принятия решения о модернизации МСЗ № 2 и 4 с повышением их производительности на 38 и 12 % соответственно.

8. Полученные результаты позволили разработать и обосновать профиль и основные технические решения для типовой отечественной ТЭС на ТБО электрической мощностью 12...24 МВт, обеспечивающей утилизацию до 360 тыс. тонн ТБО в год, образующихся в городах (районах) с населением 350...400 тыс. человек и более. Особенности этой ТЭС являются:

- энерготехнологический комплекс из двух параллельных установок, включающих топку-котел-систему газоочистки, и паровых турбин;

- сжигание несортированных ТБО с простейшей их подготовкой в приемном бункере и при низком уровне генерации  $\text{NO}_x$  при горении;
- возможность повышения температуры дутьевого воздуха при необходимости до 300 °С;
- полусухая система удаления из продуктов сгорания «кислых» газов с рукавным фильтром и многократной циркуляцией сорбента;
- применение СНКВ для уменьшения содержания  $\text{NO}_x$  в дымовых газах;
- зачистка от следов диоксинов и фуранов с помощью активированного угля;
- постоянный мониторинг основных загрязнителей в дымовых газах, сбрасываемых в атмосферу.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих изданиях:

### **Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК**

1. Эскин, Н. Б. Анализ различных технологий термической переработки твердых бытовых отходов / Н.Б. Эскин, А.Н. Тугов, А.Н. Хомутский [и др.] // Энергетик. – 1994. – № 9. – С. 6–8.
2. Тугов, А. Н. Проблемы энергетического использования твердых бытовых отходов и внедрение разработок ВТИ на мусоросжигательных заводах / А.Н. Тугов, Н.Б. Эскин, Д.С. Литун [и др.] // Электрические станции. – 1996. – № 7. – С. 62–67.
3. Росляков, П. В. О выборе оптимальной технологии термической переработки твердых бытовых отходов / П. В. Росляков, М. А. Изюмов, А. Н. Тугов [и др.] // Энергетик. – 1996. – № 9. – С. 6–12.
4. Литун, Д. С. Результаты внедрения газового воздухоподогревателя на мусоросжигательном заводе / Д. С. Литун, А. Н. Тугов, Н. Б. Эскин [и др.] // Промышленная энергетика. – 1997. – № 4. – С. 26–29.
5. Тугов, А. Н. Комплекс работ по освоению и наладке процессов термической переработки твердых бытовых отходов / А. Н. Тугов, Д. С. Литун, Н. Б. Эскин [и др.] // Электрические станции. – 2001. – № 7. – С. 19–26.
6. Шварц, А. Л. Сотрудничество ВТИ с котлостроительными заводами в развитии отечественной энергетики / А. Л. Шварц, Ю. П. Енякин, А. Н. Тугов [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2001. – № 6. – С. 5–8.
7. Радинский, Г. И. АСУ ТП энерготехнологической установки, сжигающей твердые бытовые отходы / Г. И. Радинский, А. Н. Тугов // Промышленная энергетика. – 2001. – № 8. – С. 54–58.
8. Тугов, А. Н. Особенности расчета тепловых потерь от механической неполноты сгорания твердых бытовых отходов / А. Н. Тугов, Э. П. Дик, А. Н. Соболева // Промышленная энергетика. – 2001. – № 9. – С. 45–49.
9. Угначев, В. И. Контроль работы газоочистного оборудования на установках для сжигания твердых бытовых отходов / В. И. Угначев, А. Н. Епихин, А. Н. Тугов // Теплоэнергетика. – 2001. – № 12. – С. 52–56.
10. Тугов, А. Н. Конструкции котлов для сжигания твердых бытовых отходов и специфика их теплового расчета / А. Н. Тугов, М. А. Изюмов, В. М. Супранов // Электрические станции. – 2002. – № 9. – С. 21–25.

11. Дик, Э. П. Расчет потерь тепла с механическим недожогом при термическом обезвреживании твердых бытовых отходов / Э. П. Дик, Е. В. Сотсков, А. Н. Тугов // Электрические станции. – № 11. – 2003. – С. 16–17.

12. Тугов, А. Н. Опыт освоения сжигания твердых бытовых отходов на отечественных ТЭС / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев, Г. А. Рябов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2006. – № 7. – С. 55–60.

13. Тугов, А. Н. Результаты освоения и перспективы использования технологии сжигания отходов в вихревом кипящем слое / А. Н. Тугов, Г. А. Рябов, В. И. Родионов [и др.] // Электрические станции. – 2006. – № 6. – С. 20–26.

14. Зеликов, Е. Н. Хлористо-водородная коррозия пароперегревательных поверхностей нагрева / Е. Н. Зеликов, А. Н. Тугов // Электрические станции. – 2006. – Спецвыпуск. – С. 47–49.

15. Зеликов, Е. Н. Проблемы энергетического использования потенциала твердых бытовых отходов и биомассы / Е. Н. Зеликов, А. Н. Тугов, Э. П. Дик // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. Науки. – 2006. – № 3(135). – С. 38–41.

16. Дик, Э. П. Сравнение свойств золы от сжигания углей и нетрадиционных видов топлива / Э. П. Дик, Г. А. Рябов, А. Н. Соболева, А. Н. Тугов // Теплоэнергетика. – 2007. – № 3. – С. 60–64.

17. Тугов, А. Н. Особенности эксплуатации котлов-утилизаторов, сжигающих твердые бытовые отходы / А. Н. Тугов, Э. П. Дик, А. Н. Соболева, Е. Н. Зеликов // Энергетик. – 2008. – № 1. – С. 38–41.

18. Тугов, А. Н. Методы снижения выбросов оксидов азота на ТЭС, сжигающих твердые бытовые отходы / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев // Электрические станции. – 2008. – № 11. – С. 13–17.

19. Тугов, А. Н. Методы снижения выбросов диоксинов и фуранов с дымовыми газами на предприятиях, сжигающих твердые бытовые отходы / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев, Л. Г. Федоров, Н. С. Соколов // Электрические станции. – 2008. – № 12. – С. 18–23.

20. Зеликов, Е. Н. Загрязнение и коррозия пароперегревателей котлов на ТЭС, сжигающих твердые бытовые отходы и биомассу / Е. Н. Зеликов, Г. А. Рябов, Э. П. Дик, А. Н. Тугов // Теплоэнергетика. – 2008. – № 11. – С. 73–77.

21. Тугов, А. Н. Отечественные ТЭС на ТБО. Опыт освоения и пути развития / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев, А. Н. Смирнов // Экология и промышленность России. – 2009. – № 3. – С. 4–7.

22. Тугов, А. Н. Опыт США в области использования энергетического потенциала твердых бытовых отходов / А. Н. Тугов, Ю. В. Вихрев // Энергетик. – 2009. – № 11. – С. 25–29.

23. Соковиков, В. В. О пожаровзрывобезопасности конвективных шахт энергетических котлов / В. В. Соковиков, А. Н. Тугов, С. А. Островский // Электрические станции. – 2009. – № 11. – С. 34–40.

24. Тугов, А. Н. Повышение эффективности производства электроэнергии на базе твердых бытовых отходов / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев // Теплоэнергетика. – 2011. – № 6. – С. 25–31.

25. Тугов, А. Н. Оценка влияния минеральной части отходов на содержание в дымовых газах газообразных соединений серы, хлора и фтора / А. Н. Тугов, Э. П. Дик, А. Н. Соболева // Электрические станции. – 2011. – № 10. – С. 15–20.



26. *Москвичев, В. Ф.* Анализ опыта работы паровых воздухоподогревателей на российских ТЭС на ТБО / В. Ф. Москвичев, А. Н. Тугов // *Электрические станции.* – 2011. – № 11. – С. 12–17.

### **Монография**

27. *Жуховицкий, В. Б.* Утилизация твердых бытовых отходов / В. Б. Жуховицкий, В. Я. Меллер, А. Н. Тугов. – Днепропетровск: Изд-во «Свидлер А.Л.», 2011. – 546 с.

### **Патенты**

28. *U 1 8084 RU 6 F 23 B 5/04.* Котел / Г.В. Курячая, А.В. Крячко, А.Н. Тугов [и др.]; АООТ «Белгородский завод энергетического машиностроения. – № 97115176/20; заявл. 10.09.1997; опубл.16.10.1998.

29. *U 1 9506 RU 6 F 23 G 5/00.* Мусоросжигающая установка / В.П. Воронин, Н.М. Шапин, А.Н. Тугов [и др.]; Фирма Промпроект-555.– № 981000999/20; заявл. 20.01.1998; опубл.16.03.1999.

30. *C 1 2137981 RU 6 F 23 G 5/00.* Энерготехнологическая установка для термической переработки твердых отходов / Д. С. Литун, А. Н. Тугов, Н. Б. Эскин; АООТ «ВТИ». – № 98108141/03; заявл. 22.04.98; опубл. 20.09.99, Бюл. № 26.

31. *C 1 2329447 RU 6 F 28 D 1/06.* Конденсатор пара с воздушным охлаждением и защитой от заледенения конденсата / Б. П. Афанасьев, В. Ф. Москвичев, А. Н. Тугов [и др.]; ОАО «ВТИ». – № 2007105171/06; заявл. 13.02.2007; опубл. 20.07.2008, Бюл. № 20.

32. *U 1 10177 RU 6 F 22 B 1/18.* Котел-утилизатор теплоты продуктов сгорания твердых бытовых отходов с по меньшей мере одним генератором акустических колебаний в газовом тракте / Б. П. Афанасьев, К. А. Земсков, А. Н. Тугов [и др.]; ОАО «ВТИ». – № 2010138062/06; заявл. 15.09.2010; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3.

### **Статьи в журналах, материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов**

33. *Эскин, Н. Б.* Разработка и анализ различных технологий сжигания бытовых отходов / Н. Б. Эскин, А. Н. Тугов, М. А. Изюмов // *Развитие технологий подготовки и сжигания топлива на электростанциях: сб. научн. статей.* – М.: ВТИ, 1996. – С. 77–84.

34. *Пурим, В. Р.* Твердые бытовые отходы – топливо для ТЭС малой мощности / В. Р. Пурим, А. Н. Тугов // *Аква-терм.* – 2001. – Июль. – С. 91–93.

35. *Изюмов, М. А.* Особенности теплового расчета мусоросжигательных котлов на ПЭВМ с применением программы «ТРАКТ» / М. А. Изюмов, В. М. Супранов, А. Н. Тугов // *Информационные средства и технологии: сб. докл. междунар. конф.* – М.: Станкин, 2001. Т. 2. – С. 98–101.

36. *Тугов, А. Н.* Опыт работы ВТИ по термической переработке твердых бытовых отходов / А. Н. Тугов, И. И. Надыров // *Энергетика и электрификация.* – 2002. – № 7. – С. 26–29.

37. *Тугов, А. Н.* Опыт наладки и исследований установок для сжигания ТБО / А. Н. Тугов, Г. А. Рябов, Д. С. Литун [и др.] // *Энергия из биомассы: сб. докл. Междунар. конф., 20–22 сент. 2004.* – Киев, 2004. – С. 287–288.

38. Тугов, А. Н. О выборе параметров пара для установок, сжигающих бытовые отходы / А. Н. Тугов, Э. П. Дик, Е. Н. Зеликов // ВэйстТэк-2005: сб. докл. 4-го междунар. конгресса по управлению отходами, 31 мая – 3 июня 2005. – М.: СИБИКО, 2005. – С. 286–287.

39. Тугов, А. Н. Киловатты из мусора / А. Н. Тугов, Г. А. Рябов, В. Ф. Москвичев // Твердые бытовые отходы. – 2007. – № 1. – С. 11–16.

40. Тугов, А. Н. Пути повышения эффективности выработки электроэнергии на ТЭС, сжигающих ТБО / А. Н. Тугов, Е. Н. Зеликов // ВэйстТэк-2007: сб. докл. 5-го междунар. конгресса по управлению отходами, 29 мая – 1 июня 2007. – М.: СИБИКО, 2007. – С. 285–286.

41. Дик, Э. П. Теплотехнические характеристики ТБО г. Москвы, определенные по методике ВТИ / Э. П. Дик, А. Н. Тугов, К. А. Земсков // ВэйстТэк-2007: сб. докл. 5-го междунар. конгресса по управлению отходами, 29 мая – 1 июня 2007. – М.: СИБИКО, 2007. – С. 286–287.

42. Тугов, А. Н. Минеральная часть и теплотехнические характеристики ТБО. Шлакование пароперегревателей котлов, сжигающих ТБО / А. Н. Тугов, Э. П. Дик, А. Н. Соболева, Е. Н. Зеликов // Сб. докл. IV науч.-практич. конф. «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов» (Челябинск, 4–7 июня 2007 г.). – Челябинск: ЧФ ПЭИпк, 2007. – Т. I. – С. 80–86.

43. Тугов, А. Н. Перспективы использования газотурбинных технологий на электростанциях, сжигающих отходы / А. Н. Тугов, Е. Н. Зеликов // Энергохозяйство за рубежом. – 2007. – № 4 (233). – С. 26–29.

44. Zelikov, E. N. Ash Properties Deposit Formation and Corrosion of Superheater Tubes of Municipal Solid Waste Firing in Swirl Fluidized Bed Furnaces / E. N. Zelikov, E. P. Dik, G. A. Ryabov, A. N. Tugov // Circulating Fluidized Bed Technology IX in conjunction with 4-th Int. VGB Workshop «Operating Experience with Fluidized Bed Firing Systems»: Proc. of the 9-th Int. Conf. on CFB, May 13–16, 2008. – Hamburg, Germany, 2008. – P. 887–892.

45. Tugov, A. N. Operating Experience of Fluidized Bed Furnaces of Municipal Wastes Incineration at Rudnevo Plant in Russia / A. N. Tugov, G. A. Ryabov, E. P. Dik [et al] // Circulating Fluidized Bed Technology IX in conjunction with 4-th Int. VGB Workshop «Operating Experience with Fluidized Bed Firing Systems»: Proc. of the 9-th Int. Conf. on CFB, May 13–16, 2008. – Hamburg, Germany, 2008. – P. 1063–1068.

46. Тугов, А. Н. Современные ТЭС, сжигающие бытовые отходы в циркулирующем кипящем слое (мировой опыт) / А. Н. Тугов, Г. А. Рябов // Энергохозяйство за рубежом. – 2008. – № 5 (240). – С. 12–20.

47. Тугов, А. Н. Типовое предприятие термической переработки отходов. Концепция создания / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев, М. А. Изюмов [и др.] // Твердые бытовые отходы. – 2009. – № 5. – С. 38–43.

48. Тугов, А. Н. ТЭС на ТБО – экологические проблемы и их решения / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев // Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии: сб. материалов 6-й Междунар. науч.-практ. конф. – М: Ин-т «ГИН-ЦВЕТМЕТ», 2010. – С. 14–19.

49. Тугов, А. Н. Оценка влияния минеральной части отходов на экологические характеристики образующихся при сжигании дымовых газов / А. Н. Тугов, Э. П. Дик, А. Н. Соболева // Сб. докл. V науч.-практ. конф. «Минеральная часть

топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы» (Челябинск, 7–9 июня 2011 г.). – Челябинск: ОАО «ИЦЭУ», 2011. – Т. I. – С. 78–86.

50. *Тугов, А. Н.* Технологии утилизации ТБО с отбором вторичного сырья и выработкой тепловой и электрической энергии / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев // *Новости теплоснабжения.* – 2011. – № 7. – С. 13–15.

51. *Тугов, А. Н.* Экологические и энергетические аспекты получения тепловой и электрической энергии из твердых бытовых отходов / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев // *Новини енергетики.* – 2011. – № 8. – С. 33–43.

52. *Тугов, А. Н.* Опыт использования твердых бытовых отходов для выработки тепловой и электрической энергии / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев // *Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии: сб. материалов 6-й Междунар. науч.-практ. конф.* – М: Ин-т «ГИНЦВЕТМЕТ», 2011. – С. 45–50.

53. *Тугов, А. Н.* Использование энергопотенциала твердых бытовых отходов в России и за рубежом / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев // *Энергия: экономика, техника, экология.* – 2011. – № 8. – С. 32–42.

54. *Тугов, А. Н.* Перспективы энергетической утилизации твердых бытовых отходов в России / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев, Л. Г. Федоров // В сб. докладов конф. Междунар. ассоциации по твердым отходам (ISWA) «Передовые технологии переработки и захоронения отходов: ориентиры применения и критерии выбора» [электронный ресурс], 31 мая – 2 июня, М.: СИБИКО, 2011.

---

ПМБ ВТИ. 115280, Москва, ул. Автозаводская, 14.

Тираж 100 экз. Заказ № 43.

---