

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ RDF-ТОПЛИВА В ПИРОЛИЗНОЙ ПЕЧИ

Pavel Trubaev

Institute of Power Engineering, Information Technologies  
and Operating Systems  
BSTU named after V. G. Shukov  
Belgorod, Russia  
trubaev@gmail.com

Nikolay Shein

The management  
TK Ekotrans Ltd  
Belgorod, Russia  
energy\_olver@mail.ru

Natalya Kornilova

Institute of Power Engineering, Information Technologies  
and Operating Systems  
BSTU named after V. G. Shukov  
Belgorod, Russia  
kornilovanata@ya.ru

Oleg Verevkin

Department of development  
TK Ekotrans Ltd  
Belgorod, Russia  
energy\_olver@mail.ru

В работе проанализированы методы термической утилизации твердых отходов. Сделан вывод, что наиболее эффективным методом для установок малой мощности является их сжигание в пиролитической печи. На основании инструментальных измерений оценивалась эффективность сжигания в пиролитической печи твердых древесных отходов, сформированных прессованием в виде цилиндрических брикетов, по сравнению с цельнокусковой древесиной. Были определены теплотехнические показатели эффективности работы котла и экологические показатели выбросов при сжигании различного вида отходов, сформированных в виде брикетов, а также произведен расчет максимального значения приземной концентрации вредных веществ. Проведено инструментальное измерение содержания в продуктах горения, выбрасываемых из дымовой трубы, оксида углерода, метана, фенола, бензола, сернистого ангидрида, формальдегида, хлористого водорода. По полученным результатам сделан вывод, что сжигание в печах пиролитического типа отходов, спрессованных в цилиндрические брикеты, отличаются большей тепловой эффективностью и уменьшением выбросов по сравнению с непосредственным прямым сжиганием отходов (Abstract)

*Keywords – RDF; the pyrolysis boiler; the wood fuel; the moulded cakes; efficiency (key words)*

## I. INTRODUCTION

На сегодняшний день, основным способом утилизации более 95% образующихся в России отходов является их захоронение на полигонах [1]. Недостатком этого метода является вывод из пользования больших земельных площадей, размытие и растворение грунтовыми и поверхностными водами суспензированных веществ из отходов и продуктов их биологического разложения, выделение газообразных продуктов разложения отходов в атмосферу [2]. В настоящее время отсутствуют действующие проекты по утилизации твердых бытовых отходов с выработкой электроэнергии небольшой

производительности [3].

Целью работы является анализ возможных методов энергетического использования твердых бытовых отходов и экспериментальное исследование сжигания RDF-топлива в пиролитической печи небольшой мощности с целью определения энергетической эффективности и экологических характеристики процесса.

## II. МЕТОДЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ

Методы энергетического использования твердых отходов можно классифицировать следующим образом:

- Биоконверсия (энергетический продукт – газообразное топливо).
- Прямое сжигание (энергетический продукт – тепловая энергия).
- Газификация (энергетический продукт – газообразное топливо и тепловая энергия).
- Пиролиз (энергетический продукт – твердое, жидкое, газообразное топливо).

Рассмотрим перечисленные способы.

### A. Биоконверсия

Биогаз – это смесь метана и углекислого газа, образующаяся в процессе анаэробного сбраживания органических отходов различного вида в специальных реакторах – ферментерах. Преимущества биогазовых станций – обеззараживание органических отходов сельскохозяйственного производства, постоянство выработки и энергии и максимальное использование установленной мощности. Наибольший недостаток биогазовой энергетики – большие капитальные затраты в расчете на единицу мощности. Стоимость 1 кВт установленной электрической мощности биогазовой станции колеблется от €2000 для крупных станций

мощностью свыше 10 МВт до €6000...7000 для станций мощностью менее 1 МВт, работающих на нерентабельном сырье с высокой влажностью и низкой калорийностью [4].

#### *В. Прямое сжигание*

Сжигание горючих отходов – наиболее универсальный, простой и надёжный метод их обезвреживания. Для обеспечения устойчивого процесса горения и отсутствия вредных выбросов сжигание отходов осуществляют при температуре горения не ниже 1200-1300°C. Существуют два основных метода сжигания твёрдых отходов – слоевое (с неподвижной и подвижной колосниковой или цепной решёткой) и пылевидное (во взвешенном или кипящем слое). Первый метод более прост в реализации, но второй позволяет получить более полное сгорание отходов.

Токсичные компоненты подвергаются окислению, термическому разложению и другим химическим превращениям с образованием в большей части безвредных газов (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>) и твёрдых остатков (оксидов металлов, солей), что обуславливает высокую санитарно-гигиеническую эффективность огневого метода обезвреживания. Главный недостаток прямого сжигания – загрязнения атмосферы вредными выбросами при избытке кислорода в зоне горения и низкой температуре горения. Но, например, в работе [5] утверждается, что захоронение отходов на свалках более опасно, чем переработка сжиганием. Способами повышения адиабатической температуры горения отходов, и снижения вредных выбросов, является предварительный подогрев отходов и воздуха за счёт теплоты отходящих газов, обогащение воздуха, идущего на сгорание, кислородом, подмешивание в отходы топлива [6].

#### *С. Газификация отходов*

Газификация – процесс частичного окисления, в результате которого горючие низкокалорийные отходы преобразуются в высококалорийный синтез-газ. Газификацию осуществляют в механизированных шахтных газогенераторах с вращающимися колосниковыми решётками и твёрдым шлакоудалением; в газогенераторах с псевдоожиженным слоем; в шахтных газогенераторах с фурменной подачей дутья и жидким шлакоудалением (горновой метод).

Переработка отходов газификацией имеет следующие преимущества по сравнению с методом сжигания: получаемые горючие газы могут быть использованы в качестве энергетического и технологического топлива, в то время как при сжигании практически возможно только энергетическое использование теплоты отходов (получение водяного пара или горячей воды); сокращаются выбросы золы и сернистых соединений в атмосферу [7]. Недостатком метода является необходимость тщательной сортировки отходов с исключением легкоплавких, неустойчивость процесса, образование смол и шлаков, засоряющих агрегаты.

#### *Д. Пиролиз отходов*

Пиролиз – это термическое разложение горючих отходов при недостатке кислорода.

Окислительный пиролиз (одна из стадий процесса газификации) – это процесс термического разложения отходов при их частичном сжигании или непосредственном контакте с продуктами сгорания топлива. В дальнейшем газообразные продукты разложения смешиваются с продуктами сгорания и смесь дожигают в топочных устройствах. В процессе окислительного пиролиза образуется твёрдый углеродистый остаток (кокс), в то время как твёрдый остаток процесса газификации является минеральным продуктом (зола и шлак). Конструктивное разделение зоны пиролиза ТБО и канала горения исключает поступление углеродных и пылевых частиц в поток отходящих газов, предотвращая повторный синтез диоксинов.

Сухая перегонка (сухой пиролиз) – это метод термической переработки отходов без доступа кислорода. В результате образуются пиролизный газ с высокой теплотой сгорания, жидкие продукты и твёрдый углеродистый остаток.

По материалам ряда источников пиролиз наиболее экономически эффективен и оказывает наименьшее влияние на окружающую среду [8, 9]. Однако в отношении целесообразности сухого пиролиза при сжигании твёрдых бытовых и некоторых промышленных отходов мнения специалистов расходятся [10].

#### *Е. Выводы*

На основании проведённого анализа можно заключить, что не существует единого универсального метода утилизации отходов, удовлетворяющего современным требованиям экономики и экологии. Можно выделить следующие принципы термической утилизации твёрдых бытовых отходов, позволяющие свести к минимуму негативное воздействие на окружающую среду:

- термическое разложение отходов с минимальным количеством кислорода;
- поддержание температуры в зоне горения или разложения не менее 900°C, время пребывания отходов в этой зоне не менее 2 с;
- предварительная гомонезация компонентов, перемешивание обрабатываемых отходов в печах и реакторах.

По результатам анализа можно заключить, что для установок небольшой производительности (до 200-300 кВт) наиболее эффективным методом энергетической утилизации отходов с выработкой тепловой энергии объединение методов прямого и сжигания и пиролиза в пиролизных печах. Кроме того процесс пиролиза позволяет перерабатывать широкий ряд отходов, трудно поддающихся утилизации (автопокрышки, пластмасса, отработанные масла), образующаяся зола имеет высокую плотность, а используемое оборудование имеет небольшую мощность.

### III. METHODOLOGY

В работе проводились теплотехнические испытания пиролизного котла с использованием измерительной аппаратуры: ультразвукового расходомера, газоанализаторов для анализа отходящих газов и анализа многокомпо-

нентных смесей, термометров и пирометров. В результате были определены теплотехнические показатели эффективности работы котла и экологические показатели выбросов при сжигании различного вида отходов, сформированных в виде брикетов.

#### IV. BASIC PART

##### A. Описание пиролизного котла

Действующая котельная, на которой проводились испытания, расположена в городе Белгороде (Россия) и предназначена для выработки горячей воды на нужды отопления двух административных зданий площадью 600 и 1900 м<sup>2</sup>. Тепловая нагрузка по тепловому расчету здания составляет 32 и 86 кВт соответственно и превышает нормативную примерно в 2 раза (нормативные тепловые нагрузки для указанных зданий составляют 13 и 41 кВт). Система отопления выполнена по закрытой зависимой схеме.

Котёл типа «КО-100» (рис. 1) представляет цельносварную конструкцию из стали, которая состоит из двух камер сгорания. Нижняя камера – камера газификации, в которой при ограниченном поступлении кислорода и высокой температуре топливо разлагается твёрдую фракцию и летучую часть. Верхняя камера предназначена для дожигания выделившегося газа. В нижней части камеры газификации имеется нерегулируемое окно для подачи воздуха и окно с дверцей регулировки подачи воздуха, коротая согласно инструкции по эксплуатации должна открываться только при розжиге котла. На дымовом газоходе имеется шибер.



Fig. 1. Пиролизный котёл

Пиролизный котёл позволяет обеспечить длительное горение одной закладки топлива и возможность использования в качестве топлива крупных неизмельчённых фрагментов отходов.

Согласно паспортным данным котле имеет следующие характеристики:

- Тепловая мощность – 100 кВт.
- КПД – 80-90%.
- Рабочая температура – 90 °С.
- Рабочее давление – 2-3 бар.
- Объем топки – 0,65 м<sup>3</sup>.
- Вес – 950 кг.
- Расход топлива – 0,36 м<sup>3</sup>/сутки.

При проведении замеров использовались как цельно кусковые элементы древесины и шпал, так и цилиндрические брикеты, представляющие собой цилиндры диаметром 50 мм, длиной 100-200 мм, плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>, получаемые прессованием измельчённой и дроблённой древесины [11, 12]. В котле сжигались следующие виды топлив:

- железнодорожные шпалы (топливо № 1);
- древесина–сосна (топливо № 2);
- отходы древесины: окна, двери, мебель (топливо № 3);
- древесные цилиндрические брикеты (топливо № 4);
- RDF-топливо: цилиндрические брикеты из сортированных твёрдых бытовых отходов (топливо № 5);
- Смесь древесных гранул 50% и RDF-топлива 50% (топливо № 6).

##### B. Определение тепловой эффективности пиролизного котла при сжигании брикетов

Исследовалось сжигание в пиролизной печи брикетов по сравнению с цельнокусковой древесиной, на которую рассчитана конструкция котла. Методика проведения испытаний включала:

1. Вывод котла на номинальный режим (температура сетевой воды после котла в соответствии с температурным графиком).

2. Измерение температуры воды в прямом и обратном трубопроводе и расход воды в обратном трубопроводе с использованием ультразвукового расходомера Panametrics PT878 и пирометра/контактного термомета Testo-845 (интервал 3 мин).

3. Измерение температуры и состава уходящих газов (O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) с использованием газоанализатора «Testo 330-1 LL» (интервал 1 мин).

В результате проведенных испытаний по измеренным данным рассчитывалось количество выработанной тепловой энергии, КПД котельного агрегата, тепловые потери котла и удельные расходы условного и натурального топлива. КПД котельного агрегата определялся методом обратного баланса.

При сжигании дров установлено, что процесс горения в котле стабильный и нарушается только при закладке дров. Закрытие шибера не приводит к нарушению режима горения (повышению содержания СО или O<sub>2</sub>), но при этом заметно снижается температуры отходящих газов за котлом. КПД котла в устойчивом режиме работы составляет 64-74%, что ниже паспортных значений.

Проведены две серии испытаний, в одной из них оценивалось работа котла при закрытой дверце подачи воздуха, во втором – также при частично перекрытом окне подачи воздуха. Результаты испытания представлены на рис. 2.

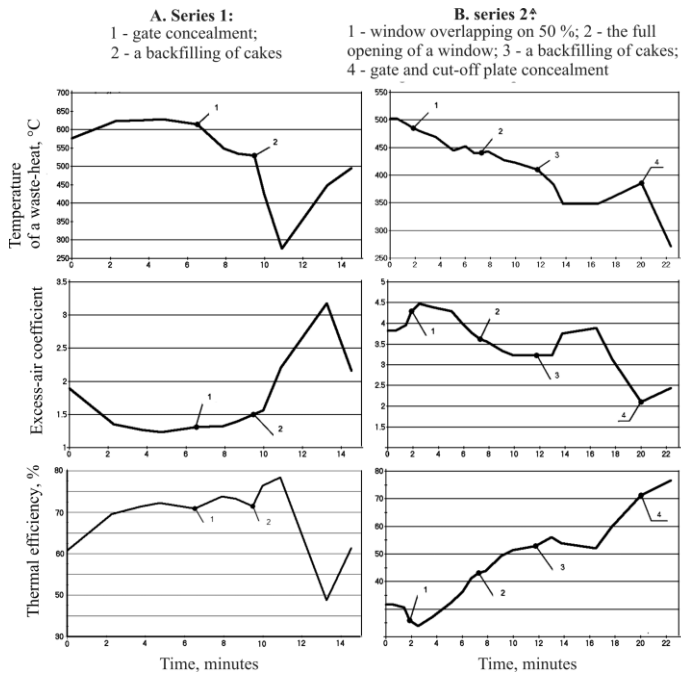


Fig. 2. Результаты измерений при сжигании древесных брикетов

Как видно из результатов, перекрытие воздухозабора пиролизной камеры привело к нарушению режима работы котла. КПД котла в устойчивом режиме работы составляет 60-74%.

Выводы по теплотехническим испытаниям котла при сжигании брикетов:

1. Средняя часовая мощность котла при сжигании дровяных брикетов составляет 95,6 кВт, что на 5,6% больше средней часовой мощности котла при сжигании дров.

2. Коэффициент полезного действия котла составляет не более 74%, средний КПД при работе в устойчивом режиме – 70%, что меньше паспортных значений (84%). Топливо в котле сгорает полностью, о чем свидетельствует низкое значение CO в отходящих газах.

*С. Оценка величины выбросов при сжигании различных отходов в пиролизном котле*

Испытания проводились в течение 3-х дней с определением содержания в газах, выходящих из котла, следующих соединений: оксида углерода, метана, фенола, бензола, сернистого ангидрида, формальдегида, хлористого водорода. Измерения проводились с использованием многокомпонентного переносного газоанализатора ГАНК-4.

По результатам измерений (табл. 1) согласно методике [13] было рассчитано максимальное значение приземной концентрации вредных веществ для условий выброса газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем. При расчёте использованы следующие данные: высота устья газохода над уровнем поверхности 10 м; диаметр устья газохода 0,25 м; температура газов в устье 200°C; температура окружающей среды 0°C; средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса 1 м/с.

TABLE I. КОНЦЕНТРАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВ, МГ/М<sup>3</sup>

№	Топливо	NO <sub>2</sub>	NO	CO	CH <sub>4</sub>	Фенол	Бензол	SO <sub>2</sub>	Формальдегид	HCl
<i>Результаты измерений проб, взятых в газоходе за котлом</i>										
1	Шпалы	12,2	11,4	123	237	<0,0015	99,1	6,44	1,97	0,472
2	Древесина (сосна)	0,5	0,5	204	203	0,786	<2,5	<0,025	<0,0015	1,73
3	Отходы древесины (окна, двери, мебель)	8,9	53,6	267	2328	12	166	4,71	14,6	0,326
4	Древесные гранулы	11,6	13,6	267	1095	0,777	<2,5	<0,025	0,898	1,6
5	RDF-топливо	0,9	6,6	94,1	1686	0,063	29,7	<0,025	7,88	0,151
6	Смесь древесных гранул и RDF-топлива	8,6	57,3	267	1164	<0,0015	65,3	<0,025	9,1	0,874
<i>Расчётная приземная концентрация (C<sub>p</sub>)</i>										
1	Шпалы	0,0001	0,0001	0,001	0,002	<0,013·10 <sup>-6</sup>	0,0009	57,4·10 <sup>-6</sup>	17,6·10 <sup>-6</sup>	4,2·10 <sup>-6</sup>
2	Древесина (сосна)	4,5·10 <sup>-6</sup>	4,5·10 <sup>-6</sup>	0,002	0,002	7·10 <sup>-6</sup>	<22,3·10 <sup>-6</sup>	<0,223·10 <sup>-6</sup>	<0,013·10 <sup>-6</sup>	1,54·10 <sup>-6</sup>
3	Отходы древесины (окна, двери, мебель)	79,4·10 <sup>-6</sup>	0,0005	0,002	0,021	0,0001	0,0015	42·10 <sup>-6</sup>	130,2·10 <sup>-6</sup>	2,9·10 <sup>-6</sup>
4	Древесные гранулы	0,0001	0,0001	0,002	0,010	6,9·10 <sup>-6</sup>	<22,3·10 <sup>-6</sup>	<0,223·10 <sup>-6</sup>	8·10 <sup>-6</sup>	1,43·10 <sup>-6</sup>
5	RDF-топливо	8·10 <sup>-6</sup>	58,9·10 <sup>-6</sup>	0,001	0,015	0,6·10 <sup>-6</sup>	0,0003	<0,223·10 <sup>-6</sup>	70,3·10 <sup>-6</sup>	1,3·10 <sup>-6</sup>
6	Смесь древесных гранул и RDF-топлива	76,7·10 <sup>-6</sup>	0,0005	0,002	0,010	<0,013·10 <sup>-6</sup>	0,0006	<0,223·10 <sup>-6</sup>	81,2·10 <sup>-6</sup>	7,8·10 <sup>-6</sup>
<i>Предельно-допустимые концентрации [14]</i>										
-	В атмосферном воздухе населённых мест: максимально разовая	0,085	0,4	5	-	0,01	0,3	0,5	0,035	-
-	среднесуточная C <sub>MAC</sub>	0,04	0,06	3	-	0,003	0,1	0,05	0,003	-
-	В воздухе производственных помещений	2	5	20	7000	0,1	15(5)	10	0,5	5
-	Класс опасности k <sub>i</sub>	4	3	4	4	3	2	3	2	2

Полученные значения были сравнены с предельно-допустимой концентрацией (ПДК) вредных веществ, приведённых в нормах [14]. По всем определяемым показателям расчётная приземная концентрация вредных веществ не превышает ПДК. В большинстве случаев она

значительно ниже допустимых значений. Это подтверждает приводимое в ряде источников утверждение, что преимущество пиролиза по сравнению с непосредственным сжиганием отходов заключается в значительном уменьшении выбросов [15-17].

Для сравнения выбросов различных видов отходов был рассчитан критерий суммарных выбросов  $C$  (рис. 3), который представлял собой сумму отношений расчётных приземной концентраций вредных веществ  $C_i$  к среднесуточным предельно-допустимым концентрациям  $C_{MACi}$  с учетом коэффициента  $k_i$ , учитывающего класс опасности вещества:

$$C = \frac{1}{N} \sum k_i \frac{C_i}{C_{MACi}} 100\%,$$

где  $N$  – число компонентов.

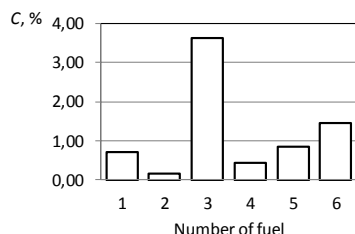


Fig. 3. Результаты измерений при сжигании древесных брикетов

Самые большие выбросы при сжигании топлива № 3 (окна, двери, мебель) объясняются наличием смол и краски, имеющихся в отходах. Сжигание RDF-топлива (№ 5 и б) не приводит к повышению выброса вредных веществ.

Полученные результаты не полностью характеризуют указанные топлива, так как кроме состава на содержание выбросов так же влияет режим сжигания (температура и избыток воздуха), но позволяют качественно сопоставить экологические характеристики топлив.

Для определения характеристик выбросов была проведена серия измерений при разных режимах работы котлов. Использовалось следующее топливо:

- RDF-топливо: древесина 70% и пластик 30% (топливо № 7);
- RDF-топливо: древесина 50% и пластик 50% (топливо № 8).

Для сжигания топлива использовался котел с колосниковой решеткой. Топливо подготавливалось в виде прессованных брикетов из предварительно измельченных отходов [10, 11] диаметром 50 мм и длиной до 400 мм (рис. 1). Температура слоя топлива, измеренная на решетке пирометром, составляла 670-760°C.



Fig. 4. Топливные брикеты

Содержание выбросов при разной температуре газа за котлом представлена на рис. 5.

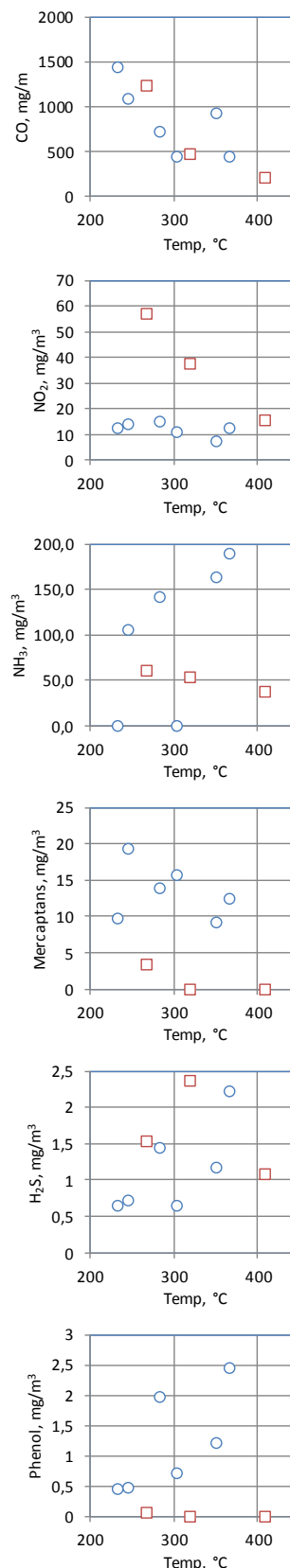


Fig. 5. Зависимость выбросов от температуры отходящих газов

Выбросы от котла со слоем сжигания значительно превосходят выбросы от пиролизного котла.

Зависимость содержания вредных выбросов от режимных параметров котла обнаружена только между содержанием СО и температурой отходящих газов (коэффициент корреляции  $-0,80$ ) или коэффициентом избытка воздуха ( $-0,84$ ). Между содержанием остальных выбросов и  $t_{ог}$  или  $\alpha$  зависимости нет (модуль коэффициента корреляции не превышает  $0,39$ ). Так же нет зависимости между содержанием различных выбросов. Таким образом кроме полноты сгорания, которую характеризует содержание СО, содержание выбросов в области рабочих диапазонов функционирования водогрейных котлов от режима их работы не зависит.

## V. CONCLUSION

Значительное уменьшение выбросов позволяет использовать метод утилизации путем сжигания отходов в пиролизном котле при бытовом отоплении, например в системах автоматизации теплоснабжения зданий и поселений. Но следует отметить, что в работе не определялось содержание диоксинов.

## VI. SUMMARY

На основании проведённых исследований можно заключить, что утилизация твёрдых отходов, сформированных прессованием в виде цилиндрических брикетов диаметром 50 мм, длиной 100-200 мм, плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$ , характеризуется более высокой эффективностью (средняя мощность на  $5,6\%$  больше), чем сжигания древесины из цельных кусков.

Измерения содержания в отходящих газах оксида углерода, метана, фенола, бензола, сернистого ангидрида, формальдегида, хлористого водорода показало, что для всех видов исследуемых сжигаемых материалов расчётная приземная концентрация вредных веществ не превышают предельно допустимые концентрации, и в большинстве случаев значительно ниже их. Это подтверждает, что пиролизные котлы, по сравнению с непосредственным сжиганием отходов, отличаются значительным уменьшением выбросов. Содержание выбросов в отходящих газах, кроме характеризующего полноту сгорания монооксида углерода, от режимных параметров котлов не зависит

## References

- [1] L. Ia. Shubov, M. E. Stavrovskiy, D. V. Shehirev, *Tekhnologii othodov (tekhnologicheskie protsessy v servise)* [Technologies of waste (technology processes in service)], Moscow: RSUTS, 2006 (in Russian).
- [2] Z. I. Alexanderovskoy, *Sanitarnaia ochistka gorodov ot tverd'kh by'tovy'kh othodov* [Sanitary cleaning of the cities of municipal solid waste], Moscow: Stroiyzdat, 1977. (in Russian).
- [3] I. Yu. Egorov, "Tiazhelaia ekologicheskaiia situatsiia stanet odnim iz glavnykh drayverov rosta [The difficult ecological situation will become one of the main drivers of growth]", *Energetika i*

- promyshlennost* [Power and industry], 2014, № 2, URL: [http://esco.co.ua/journal/industry/2014\\_2/art245.html](http://esco.co.ua/journal/industry/2014_2/art245.html). (in Russian).
- [4] B. I. Levin, *Ispol'zovanie tverd'kh by'tovy'kh othodov v sistemakh energosnabzheniia* [Use of municipal solid waste in systems of power supply], Moscow: Energoizdat, 1982. (in Russian).
- [5] E. G. Vatcet, M. O. Shpakov, S. S. Timofeeva, "Waste in the income: ways of processing of municipal solid waste. [Othody v dohody: sposoby pererabotki tverd'kh by'tovy'kh othodov]", 2th Conf. Problems of sustainable development of society in Irkutsk, pp. 57-60, 1997. (in Russian).
- [6] A.V.Smagin, V.V. Guseva, "Vozobnovliaemy'e istochniki energii – osnova al'ternativnoi' teploenergetiki [Renewable energy resources - a basis alternative heat-and-power engineering]." URL: [http://esco.co.ua/journal/2009\\_4/art135.htm](http://esco.co.ua/journal/2009_4/art135.htm). (in Russian).
- [7] *Resource Recovery to Approach Zero Municipal Waste*, ed. Mohammad J. Taherzadeh, Tobias Richard, Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [8] D. Chen, L. Yin, H. Wang, P. He, "Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review", *Waste Management*, Vol. 34, Issue 12, pp. 2466-2486, December 2014. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.022
- [9] K. Tadao, H. Masakatsu, *Water Res.*, Vol. 16., No 1., pp. 1569-1575, 1982.
- [10] S. N. Glagolev, V. S. Sevostyanov, S. V. Svergzuzova, I. G. Shaiychiev, V. I. Uralskiy, M. V. Sevostyanov, D. D. Fetisov and L. I. Shinkarev, "Tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlia pererabotki tekhnogenny'kh materialov [Technology complexes and equipment for processing of technogenic materials]", *Bulletin of KTU*, No 10 (15), pp. 198-200, 2012. (in Russian).
- [11] S. N. Glagolev, V. S. Sevostyanov, A. M. Gridchin, V. I. Uralskiy, M. V. Sevostyanov and V. V. Iadykina, "Resurso-energoberegaiushchie moduli dlia kompleksnoy utilizatsii tekhnogennykh materialov [Resource-energy saving modules for complex utilization of technogenic materials]", *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, No 6, pp. 102-106, 2013. (in Russian).
- [12] "Metodika rascheta koncentracii v atmosfernom vozdukh'e vredny'kh veshchestv, soderzhashchikh v vy'brosakh predpriatii (OND-86) [Method of calculation of concentration in an atmospheric air of the harmful substances which are contained in emissions of the enterprises]", Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. (in Russian).
- [13] "Predelno dopustimye koncentracii (PDK) zagriazniayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh'e naselennykh mest GN 2.1.6.1338-03 [The Threshold Limit Values (TLV) of pollutants in an atmospheric air of the inhabited places ])", Moscow, 2003. (in Russian).
- [14] I. O. Korovin, "Issledovanie piroliznoy utilizatsii uglesoderzhashchikh tvorydykh by'tovykh othodov [Research of pyrolysis utilization of carbonaceous municipal solid waste]", *Cand. diss., Tiumen*, 2003. (in Russian).
- [15] S. K. Sergeev, A. N. Potapenko, A. V. Belousov, E. A. Potapenko, "Matematicheskie modeli upravleniia protsessami teplosnabzheniia zdaniy dlia avtomatizirovanny'kh sistem upravleniia [Mathematical models of management of processes of heat supply of buildings for automated control systems]", *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, No 1, pp. 113-117, 2007. (in Russian).
- [16] A. V. Belousov, Yu. A. Koshlich, A.B. Bystrova. "Perspektivy primeneniya sovremennykh statisticheskikh determinirovannykh metodov prognozirovaniya v sistemah monitoringa jenergotrebleniya [Perspectives of application of the modern statistical determined forecasting methods in energy consumption monitoring systems]" *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, No 4, pp. 192-196, 2012. (in Russian).
- [17] N.V. Kornilova, P.A. Trubaev, "The determination of harmful emissions of a hot-water boiler for the incineration of solid wastes of various types [Opredelenie vrednykh vybrosov vodogreynogo kotla pri szhigani tverd'kh othodov razlichnogo vida]", *International Scientific Research Journal*, No 10 (52), Part 2, pp. 123-126, 2016. DOI 10.18454/IRJ.2016.52.191. (in Russian).