

Экспериментальное исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов

Р.Н. Габитов¹, О.Б. Колибаба¹, К.В. Аксенчик², В.А. Артемьева¹

¹ ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

² ФГБОУВО «Череповецкий государственный университет», г. Череповец, Российская Федерация
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru, akskos@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Одним из основных направлений энергетической политики России является использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии. К таким источникам относят и твердые органические отходы, в том числе бытовые. В настоящее время существует возможность экономически выгодно, экологически безопасно и технически доступно перерабатывать твердые бытовые отходы без предварительной сортировки, используя термические методы, в том числе пиролиз. Изучению процесса пиролиза посвящены работы П.Басу, Шубова Л.Я., Кузнецова Г.В., Копачева А.Г. и др. Между тем окислительный пиролиз, являющийся наиболее универсальным и не зависящим от фракционного состава и фазового состояния отходов, их влажности и зольности, изучен недостаточно. В связи с этим актуальной задачей является экспериментальное исследование окислительного пиролиза смеси твердых бытовых отходов и отдельных ее компонентов.

Материалы и методы: В качестве методов термического анализа для исследования процесса окислительного пиролиза твердых бытовых отходов использованы: термогравиметрический анализ (ТГ-анализ), в ходе которого непрерывно регистрировалось изменение массы исследуемого образца при изменении его температуры; дифференциально-сканирующая калориметрия, в ходе которой непрерывно регистрировались термические эффекты, которыми сопровождались фазовые и химические превращения образца при его нагреве; масс-спектрометрия газовых смесей (МС-анализ).

Результаты: Проведен термический анализ смеси твердых бытовых отходов среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1 и 10 %. По результатам экспериментов определены температурные диапазоны процесса пиролиза и скорость убыли массы образца твердых бытовых отходов при протекании процессов сушки и окислительного пиролиза, тепловые эффекты, сопровождающие данные процессы, а также состав и объемы газов, получаемых при окислительном пиролизе смеси твердых бытовых отходов и ее компонентов в среде с содержанием кислорода 1 и 10 %.

Выводы: Установлено, что окислительный пиролиз при наличии кислорода в атмосфере 1 % сопровождается меньшим тепловым эффектом, чем пиролиз с содержанием кислорода 10 %, но при этом образуется более калорийный пиролизный газ. Результаты экспериментальных исследований окислительного пиролиза могут быть использованы для расчета конструктивных и режимных параметров термических реакторов для переработки твердых бытовых отходов.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, термический пиролиз, синхронный термоанализатор, масс-спектрометрия, термогравиметрический анализ, дифференциально-сканирующая калориметрия.

Experimental study of solid waste oxidative pyrolysis

R.N. Gabitov¹, O.B. Kolibaba¹, K.V. Aksenichik², V.A. Artemyeva¹

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

² Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation

E-mail: tevp@tvp.ispu.ru, akskos@mail.ru

Abstract

Background: One of the main directions of Russia's energy policy is the use of alternative renewable energy sources. Such sources include solid organic wastes, including municipal waste (MSW). There are now methods of economically profitable, environmentally friendly and technically available processing of solid waste without its preliminary sorting by using thermal methods, including pyrolysis. The works of scientists such as P. Basu, L.Ya. Shubov, G.V. Kuznetsov, A.G. Kopahev and others are devoted to the studies of pyrolysis. However, oxidative pyrolysis, which represents the most universal type independent of the fractional composition and phase state of the waste, its moisture and ash content, has not been studied well yet. That is why an urgent problem is to conduct an experimental study of oxidative pyrolysis of MSW mixture and its individual components.

Materials and methods: MSW oxidative pyrolysis was studied by the following methods of thermal analysis: thermogravimetric analysis (TG analysis), which consisted in continuous recording of the test sample mass change at the changes of its temperature; differential scanning calorimetry (DSC), which consisted in continuous registering of the thermal effects that accompanied the phase and chemical transformations of the sample during its heating; mass spectrometry of gaseous mixtures (MS – analysis).

Results: We have done a thermal analysis of the average morphological composition of the MSW mixture and its individual components in the process of oxidative pyrolysis with an oxygen content of 1 % and 10 % in the atmosphere. As a result of the experiments, we determined pyrolysis temperature ranges and the rate of solid waste sample mass decrease in the processes

of drying and oxidative pyrolysis, heat effects accompanying these processes, and the composition and volumes of gases obtained from the oxidative pyrolysis of MSW and its components in the environment with the oxygen content of 1 % and 10 %.

Conclusions: It has been found that in the presence of oxygen (1 %) in the atmosphere, oxidative pyrolysis is accompanied by a weaker thermal effect than in the atmosphere with 10 % oxygen content, but formation of a more calorific pyrolysis gas. The results of experimental studies of oxidative pyrolysis can be used to determine the design and operating parameters of thermal reactors for MSW processing.

Key words: municipal solid waste, thermal pyrolysis, simultaneous thermal analyzer, mass spectrometry, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.014-019

Введение. К твердым бытовым отходам (ТБО) относят отходы, образующиеся у населения, на торговых предприятиях, в учреждениях и муниципальных службах. ТБО представляют собой гетерогенную смесь сложного морфологического состава, включающую: бумагу, текстиль, пластмассы, пищевые и растительные компоненты, камни, кости, кожу, резину, дерево, черные и цветные металлы, стекломой.

Широко распространенными технологиями утилизации отходов являются термические методы, к которым относится пиролиз. Термическая переработка сырья позволяет получить не только горючий газ, но и решить экологическую проблему, связанную с загрязнением окружающей среды и рекультивацией земельных угодий.

В технологиях переработки ТБО используют различные схемы пиролизных установок [1], например шахтные печи, в которых процесс пиролиза сопровождается небольшими подсосами воздуха (окислительный пиролиз). Метод окислительного пиролиза с последующим сжиганием пиролизных газов универсален и не зависит от фракционного состава и фазового состояния отходов, их влажности и зольности. При этом продукты сгорания пиролизных газов менее загрязнены летучей золой и сажей, чем при прямом сжигании ТБО, что существенно упрощает схему газоочистки.

В целях повышения эффективности переработки ТБО методом окислительного пиролиза актуальной задачей является экспериментальное исследование данного процесса для оценки влияния ряда параметров (влажность исходного сырья, состав ТБО, увеличение кислорода в атмосфере и др.) на выход и состав пиролизных газов [2–5].

Методы исследования. Целью данного исследования является проведение термического анализа [6] смеси ТБО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов для разработки способов повышения эффективности ее энергетического использования в теплотехнологии.

Исследования окислительного пиролиза были проведены для образцов смеси ТБО среднего морфологического состава, содержащих: бумагу – 43 %; текстильные отходы – 7,5 %; полимерную пленку – 7,5 % и пищевые отходы – 42 %) [7], а также для отдельных ком-

понентов смеси в атмосфере с содержанием кислорода 1 и 10 %.

Экспериментальные исследования выполнены при помощи комплекса синхронного термического анализа фирмы NETZSCH. Измерительный комплекс состоит из блока термического анализа STA 449 F3 Jupiter, квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 C Aeolos и блока импульсного термического анализа PulseTA.

В качестве методов термического анализа для исследования процесса окислительного пиролиза ТБО были использованы:

– термогравиметрический анализ (ТГ-анализ), в ходе которого непрерывно регистрировалось изменение массы исследуемого образца при изменении его температуры;

– дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК), в ходе которой непрерывно регистрировались термические эффекты, которыми сопровождались фазовые и химические превращения образца при его нагреве;

– масс-спектрометрия газовых смесей (МС-анализ).

При синхронном ТГ-ДСК анализе термоанализатор позволяет одновременно измерять изменение теплового потока и массы образца в зависимости от его температуры или во времени. Синхронный анализ позволяет не только обрабатывать большое число измерений, но и упрощает интерпретацию результатов благодаря возможности отделить эндо- и экзотермические процессы, не сопровождающиеся изменением массы, от процессов, при которых происходит изменение массы.

В результате термического анализа получены так называемые термогравиметрические (ТГ) кривые – зависимости изменения массы навески от температуры или во времени. По значению производной от ТГ-кривой (дифференциально-термогравиметрический анализ – ДТГ) можно установить температуру или интервал времени, при которых происходит максимальное уменьшение массы навески.

Методом дифференциально-сканирующей калориметрии было определено количество теплоты, которое выделяется или поглощается в результате химических реакций. Состав вещества, выделившегося в процессе пиролиза, определен с помощью масс-спектрометра QMS 403.

В ходе эксперимента образец ТБО загружали в платиновый тигель, который устанавли-

вали на микровесах в ячейке дифференциально сканирующего ДСК-сенсора. В другую ячейку помещали образец сравнения – тигель без образца (эталон). Наличие двойной измерительной ячейки позволяет скомпенсировать посторонние воздействия (процессы, связанные с тепловыделением или теплопоглощением) на результат измерения. Теплота подводилась от электронагревателя камеры, внутри которой были установлены образцы. Масса навески варьировалась в пределах 3–15 мг. Температуру исследуемого образца измеряли дифференциальными термопарами, размещенными на нижней поверхности тигля, которые были подключены к вторичному прибору. Нагрев проводили в среде инертного газа (аргона), обогащенного кислородом (1 или 10 % об.), от 20 до 900 °С со скоростью 5 °С/мин.

В ходе опыта STA 449 F3 Jupiter непрерывно регистрировал убыль массы образца ТБО в процессе его нагрева (ТГ-кривая), температуру образца и ДСК-сигнал. Предельная чувствительность прибора по массе составляла 0,1 мкг, а по температуре – 0,001 °С.

Качественный состав продуктов пиролиза был определен квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aeolos путем нахождения парциального давления отдельных компонентов газовой смеси. Разделение смеси по компонентам производили посредством ее ионизации током. Пучок ионов газа при помощи электрического поля разгоняется до высокой скорости и проходит через квадрупольный анализатор масс, состоящий из четырех металлических стержней, к которым приложено напряжение таким образом, чтобы в каждый момент времени через анализатор пролетали ионы только с одним соотношением массы к заряду – M/z .

Процесс сбора и обработки данных был автоматизирован при помощи программного обеспечения прибора NETZSCH Proteus Thermal Analysis.

Результаты исследования. Результаты термического анализа образца смеси ТБО, состоящего из бумаги, текстильных, пищевых отходов и полимерной пленки, представлены на рис. 1 в виде ДСК, ТГ и ДТГ-кривых.

Результаты ТГ-анализа (ТГ-кривая) показали, что кривую изменения массы образца в процессе нагрева можно разбить на несколько характерных интервалов. Первый интервал температуры 20–220 °С характеризуется незначительным изменением массы образца (от 0,5 до 8 %) из-за испарения физической и связанной влаги с поверхности пористой структуры материала. При дальнейшем повышении температуры до 320–330 °С происходит достаточно быстрое уменьшение массы, обусловленное термическим разложением вещества и интенсивным выходом летучих соединений.

При достижении температуры 330 °С кривая изменения массы имеет ярко выраженный изгиб, который свидетельствует о снижении скорости выхода летучих соединений. При температуре 490 °С наблюдается резкое падение скорости убыли массы вещества, что свидетельствует о замедлении термического разложения ТБО. При температуре 540 °С выход летучих веществ заканчивается. Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии показали, что при температурах до 220 °С в исследуемых образцах происходят эндотермические процессы, связанные с испарением влаги. При дальнейшем росте температуры в образцах протекают экзотермические процессы.

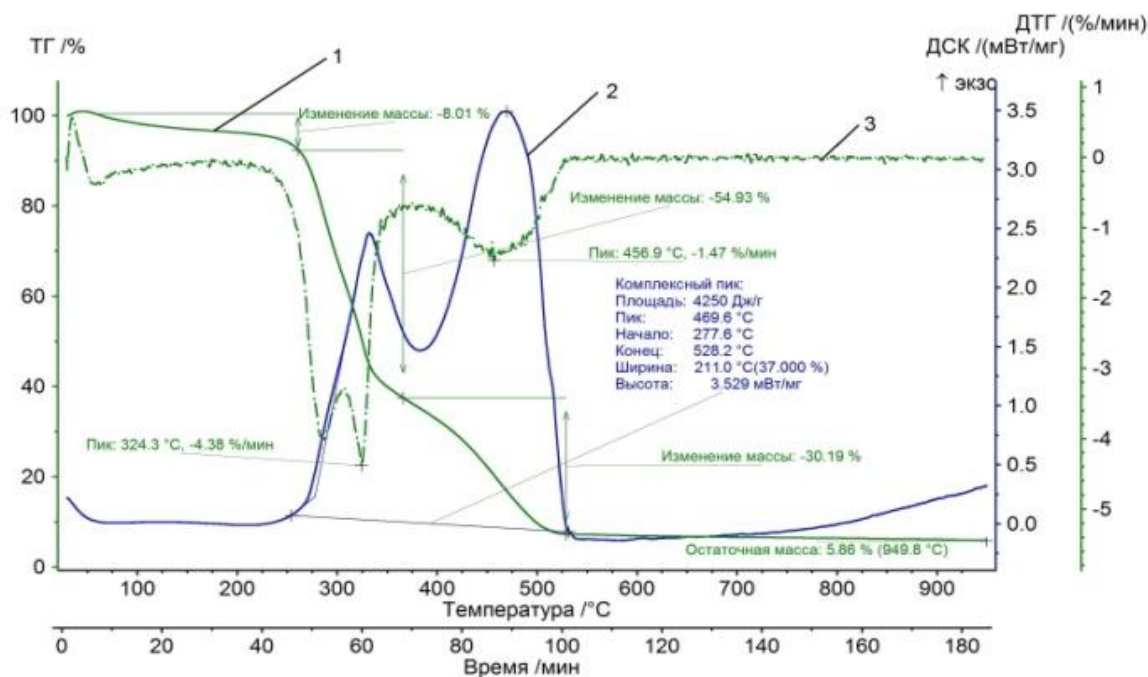


Рис. 1. Кривые для образцов ТБО при содержании кислорода в атмосфере 1 %: 1 – ТГ; 2 – ДСК; 3 – ДТГ

Кривая ДСК имеет два ярко выраженных экзотермических пика – при температурах 330 и 470 °С. Затем функция начинает резко убывать. Это свидетельствует о том, что интенсивность экзотермических процессов уменьшается. Результаты дифференциально-термогравиметрического анализа показали, что максимальная убыль массы образца имеет место при температурах 330 и 470 °С, что соответствует максимальной выходу газовой фазы в процессе пиролиза ТБО.

Аналогичный эксперимент был выполнен в среде с содержанием кислорода 10 %, что интенсифицирует процесс пиролиза.

Результаты термического анализа процесса пиролиза смеси ТБО и отдельных ее компонентов в среде с содержанием кислорода 1 и 10 % приведены в табл. 1. Качественный состав пиролизного газа получен в результате обработки сигналов масс-спектрометра (зависимости ионного тока от температуры), распределенных по массовым числам (рис. 2). На рис. 2 приведены результаты измерений в процессе пиролиза ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 1 %. Аналогичные эксперименты были выполнены для пиролиза ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 10 %.

Для идентификации компонентов пиролизного газа были использованы базы данных

масс-спектрометров NIST [8], содержащие информацию о масс-спектрах веществ.

Анализ полученных данных (рис. 2) показывает, что основными компонентами пиролизного газа являются: H_2 (2), CH_4 (16), H_2O (18), CO (28), CO_2 (44). Вклад других компонентов с массовыми числами 12, 13, 14, 15, 17 и 46 в массу составляющую основных компонентов определен сопоставлением с результатами, представленными в базах данных масс-спектрометров NIST.

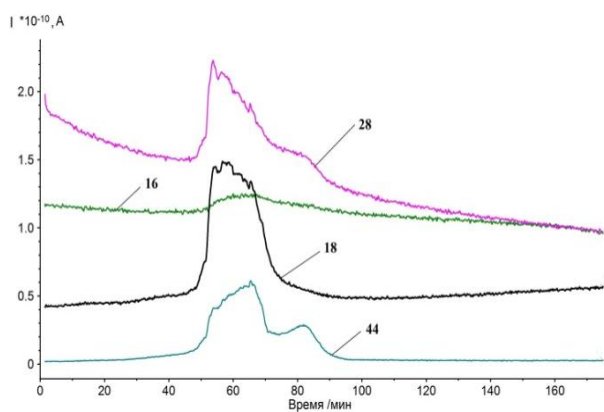
В табл. 2 приведены данные масс-спектра по основным компонентам газовой смеси в виде: эксперимент / базовое значение масс-спектров NIST.

Количественный состав пиролизного газа определен по методу внутреннего стандарта [9], согласно которому интенсивности сигналов анализируемых соединений сравниваются с сигналом стандартного вещества (калибровочного газа), а для расчета массовых долей компонентов пиролизного газа была использована методика, предложенная Козловым А.Н. и Кейко А.В. [10].

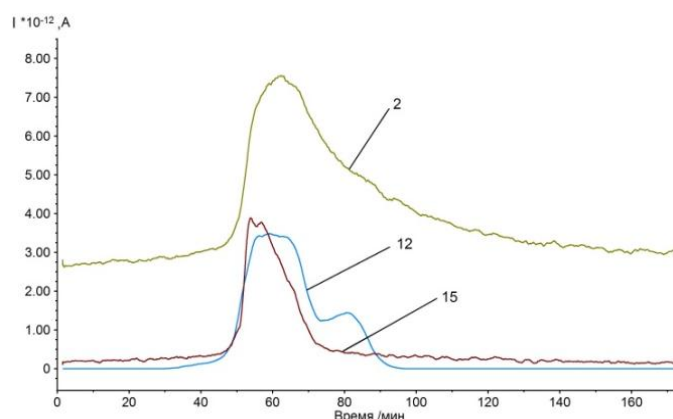
В табл. 3 приведены данные о качественном и количественном составе газа, выделившегося в процессе окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1 и 10 %.

Таблица 1. Результаты термического анализа ТБО и его компонентов

Компонент	Температуры начала и окончания процесса пиролиза, °С		Температура пика выделения энергии, °С		Остаточная масса, %		Тепловой эффект пиролиза, Дж/г	
	1 %	10 %	1 %	10 %	1 %	10 %	1 %	10 %
ТБО	225–540	215–550	469	454	6,48	6,49	4250	6685
Бумага	245–492	245–488	477	444	30,8	9,69	4951	6624
Картофель	225–540	215–550	511	511	3,8	4,13	3672	6696
Полиэтилен	340–540	280–550	395	375	10,01	9,96	3954	8685
Ткань	240–500	240–490	345	336	14,34	13,43	4376	5925



а)



б)

Рис. 2. Масс-спектр газа, образовавшегося при пиролизе ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 1 %: а – газы с большим значением сигнала масс-спектрометра; б – газы с малым значением сигнала масс-спектрометра (цифры у кривых означают массовые числа)

Таблица 2. Сравнение экспериментальных данных с данными базы NIST

Компоненты	Массовые числа										
	2	12	13	14	15	16	17	18	28	44	46
H	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CH ₄	–	2,8/3	6,8/8	17/20	80/87	100	–	–	–	–	–
CO	–	4,5/5	–	–	–	0,8/1,1	–	–	100	–	–
H ₂ O	–	7,9/9	–	–	–	0,7/1	20/23	100	–	–	–
CO ₂	–	–	–	–	–	8,8/9	–	–	10/13	100	0,2/0,5

Таблица 3. Массовые доли основных компонентов пиролизного газа, в %

Компоненты	CH ₄		CO		H ₂ O		CO ₂		H ₂	
	1 %	10 %	1 %	10 %	1 %	10 %	1 %	10 %	1 %	10 %
ТБО	24,11	11,93	41,25	32,91	18,25	26,66	16,25	28,45	0,14	0,03
Бумага	21,7	11	52,51	44,59	12,84	19,64	12,9	24,75	0,05	0,02
Картофель	27,94	14	30,52	22,55	22,34	32,34	19,11	31,08	0,09	0,03
Ткань	16,24	7,2	41,89	35,82	20,58	26,98	20,48	29,94	0,81	0,06
Полиэтилен	21,88	9,32	45,05	29,93	20,28	29,75	12,78	30,93	0,07	0,01

По результатам анализа установлено, что содержание прочих компонентов в пиролизном газе не превышает 0,5 %.

Расчет теплотворной способности пиролизного газа выполнен по принципу аддитивности:

$$Q_H^p = \sum_{i=1}^n Q_{CH_4} g_{CH_4} + Q_{CO} g_{CO} + Q_{H_2} g_{H_2}, \quad (1)$$

где Q_{CH_4} , Q_{CO} , Q_{H_2} – низшая теплота сгорания метана, монооксида углерода и водорода соответственно, Дж/кг; g_{CH_4} , g_{CO} , g_{H_2} – массовые доли метана, монооксида углерода и водорода соответственно.

Результаты расчетов теплотворной способности горючего газа, полученного в процессе окислительного пиролиза в среде с содержанием кислорода 1 и 10 %, сведены в табл. 4.

Таблица 4. Теплотворная способность пиролизного газа

Компоненты	Содержание кислорода 1 %, Q, МДж/кг	Содержание кислорода 10 %, Q, МДж/кг
ТБО	16,86	10,00
Бумага	16,87	10,64
Картофель	16,15	10,10
Ткань	14,40	7,70
Полиэтилен	16,77	8,30

Выводы. Для окислительного пиролиза ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 1 % характерно высокое содержание монооксида углерода (до 42 % по массе). При этом теплотворная способность пиролизного газа составила 16,8 МДж/кг и тепловыделение (эффект пиролиза) 4,25 МДж/кг. При окислительном пиролизе ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 10 % теплотворная способность пиролизного газа составила 10 МДж/кг и тепловыделение – 6,7 МДж/кг.

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов:

1. Выполненный термический анализ процесса окислительного пиролиза смеси ТБО среднего морфологического состава и отдель-

ных ее компонентов с содержанием кислорода в среде 1 и 10 % позволил получить данные о выходе летучих соединений, максимальной скорости убыли массы и температуре пиков тепловыделения.

2. Окислительный пиролиз при наличии кислорода в рабочей зоне реактора 1 % сопровождается меньшим тепловым эффектом, чем пиролиз с содержанием кислорода 10 %, но при этом образуется более калорийный пиролизный газ.

3. Экспериментальные исследования позволили определить состав и объемы газов при окислительном пиролизе смеси ТБО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов.

4. Результаты экспериментальных исследований окислительного пиролиза могут быть использованы для расчета конструктивных и режимных параметров термических реакторов для переработки ТБО.

Список литературы

1. **Переработка** твердых бытовых отходов методом пиролиза. Обз. информ. – М.: ЦНИИТЭИМС, 1983. – 40 с.
2. **Basu P.** Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and Theory. – Burlington, USA, 2010. – 365 p.
3. **Кузнецов Г.В., Полсонграм М.** Зависимость состава продуктов пиролиза древесины от режима теплового воздействия // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 125–129.
4. **Любов В.К., Любова С.В.** Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. – Архангельск, 2010. – 496 с.
5. **Исследование** влияния влажности на температурный режим переработки твердых бытовых отходов, содержащих текстиль, термическими методами / О.Б. Колибаба, В.А. Горбунов, О.И. Горинов и др. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 2. – С. 192–196.
6. **Уэндландт У.** Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 527 с.
7. **Термическая** утилизация твердых бытовых отходов. Концепция НИИСтромкомполит. – Красноярск, 2006. – 15 с.
8. **Открытая** база данных масс-спектров NIST [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

9. **Лебедев А.Т.** Масс-спектрометрия органической химии. – М.: БИНОМ., 2003. – 493 с.

10. **Thermal analysis in numerical thermodynamic modeling of solid fuel conversion / A.N. Kozlov, D.A. Svishchev, I.G. Donskoi, A.V. Keiko // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.** – 2012. – Vol. 109, No. 3. – P. 1311–1317.

References

1. *Pererabotka tverdykh bytovykh otkhodov metodom piroliza.* Obz. Inform. [Recycling of municipal solid waste by pyrolysis]. Moscow, TsNIITEIMS, 1983. 40 p.

2. Prabir, Basu. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory. Academic Press, 30 Corporate drive, Burlington, USA, 2010. 365 p.

3. Kuznetsov, G.V., Polsongkram, M. Zavisimost' sostava produktov piroliza drevsnoy biomassy ot rezhima teplovogo vozdeystviya [Dependence of pyrolysis products of wood biomass on thermal influence regime]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2011, no. 1, pp. 125–129.

4. Lyubov, V.K., Lyubov, S.V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniya biotopliv* [Improving the efficiency of using biofuels in power industry]. Arkhangel'sk, 2010. 496 p.

5. Kolibaba, O.B., Gorbunov, V.A., Gorinov, O.I., Samyshina, O.V., Gabitov, R.N. Issledovanie vliyaniya vlazhnosti na

temperaturnyy rezhim pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov, sodержashchikh tekstil', termicheskimi metodami [Investigation into the influence of humidity on the temperature regime of processing municipal solid waste containing textiles by thermal methods]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2016, no. 2, pp. 192–196.

6. Uendlandt, U. *Termicheskie metody analiza* [Thermal methods of analysis]. Moscow, Mir, 1978. 527 p.

7. *Termicheskaya utilizatsiya tverdykh bytovykh otkhodov. Kontseptsiya NIIStromkompozit* [Thermal utilization of municipal solid waste]. Krasnoyarsk, 2006. 15 p.

8. *Otkrytaya baza dannykh mass-spektrov NIST* [The open mass spectra database NIST]. Available at: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

9. Lebedev, A.T. *Mass-spektrometriya organicheskoy khimii* [Mass spectrometry in organic chemistry]. Moscow, BINOM, 2003. 493 p.

10. Kozlov, A.N., Svishchev, D.A., Donskoi, I.G., Keiko, A.V. Thermal analysis in numerical thermodynamic modeling of solid fuel conversion. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, vol. 109, no. 3, pp. 1311–1317.

Габитов Рамиль Наилевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

инженер кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,

e-mail: Ramilgab@mail.ru

Gabitov Ramil Nailevich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Engineer of Thermal Technologies and Gas Supply Department,

e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

КолИБаба Ольга Борисовна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, зав. кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,

e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Kolibaba Olga Borisovna,

Ivanovo State Power Engineering University,

Candidate of Engineering, Associate Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department,

e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Аксенчик Константин Васильевич,

ФГБОУВО «Череповецкий государственный университет»,

кандидат технических наук, зав. кафедры химических технологий,

e-mail: akskos@mail.ru

Aksenichik Konstantin Vasilyevich,

Cherepovets State University, Cherepovets,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of the Chemical Technologies Department,

e-mail: akskos@mail.ru

Артемяева Валерия Андреевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

магистрант 2-го курса,

e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Artemyeva Valeria Andreyevna,

Ivanovo State Power Engineering University,

2nd year Master Course Student,

e-mail: tevp@tvp.ispu.ru