

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 62.932.2

Ольга Борисовна Колибаба

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: tevр@tvp.ispu.ru

Рамиль Наилевич Габитов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: Ramilgab@mail.ru

Денис Александрович Долинин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: murcielago82@mail.ru

Никита Сергеевич Мольков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: nik-molk@yandex.ru

О влиянии скорости нагрева на процесс окислительного пиролиза твердых коммунальных отходов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Переработка твердых коммунальных отходов в энергию – одно из приоритетных направлений энергетической политики России. Утилизация твердых коммунальных отходов с применением термических процессов переработки, включая сухой и окислительный пиролиз, представляет собой экономически эффективный, экологически безопасный и технически осуществимый подход. Значимыми параметрами процесса пиролиза, определяющими соотношение получаемых товарных продуктов, являются: морфологический состав и скорость нагрева сырья, содержание кислорода в рабочей зоне реактора (в случае окислительного пиролиза), температурный уровень процесса. Оценить влияние этих факторов на характер протекания процесса позволяют методы экспериментальных исследований. Несмотря на свою универсальность, обусловленную возможностью переработки отходов различного фракционного состава и агрегатного состояния, окислительный пиролиз не получил широкого распространения ввиду недостатка технологических параметров проведения процесса в установках. В связи с этим актуальным является исследование окислительного пиролиза твердых коммунальных отходов с использованием современных инструментов экспериментальных исследований.

Материалы и методы. Изучение процесса разложения твердых коммунальных отходов осуществлено с помощью комплексного термического метода, включающего термогравиметрию, дифференциальную сканирующую калориметрию и масс-спектрометрическое исследование газообразных продуктов.

Результаты. Установлено, что увеличение скорости нагрева с 5 до 15°С/мин сокращает время термической обработки в 3 раза, но сопровождается снижением энергетической эффективности процесса. При скорости нагрева 5°С/мин зафиксированы максимальные значения теплового эффекта (4250 Дж/г) и теплоты сгорания пиролизного

газа (11,07 МДж/кг), а также минимальный выход твердого остатка (5,86 %). Рост скорости нагрева приводит к смещению температур разложения в высокотемпературную область и снижению выхода энергетически ценных компонентов газа.

Выводы. В ходе проведенных исследований определены оптимальные температурные параметры при скорости нагрева в 5 °С/мин для поддержания процесса окислительного пиролиза отходов в термических реакторах с наибольшим выходом энергии.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, окислительный пиролиз, синхронный термический анализ, масс-спектрометрия, термогравиметрический анализ, дифференциально-сканирующая калориметрия

Olga Borisovna Kolibaba

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Ramil Nailevich Gabitov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: Ramilgab@mail.ru

Denis Alexandrovich Dolinin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: murcielago82@mail.ru

Nikita Sergeevich Molkov

Ivanovo State Power Engineering University, Post graduate Student of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nik-molk@yandex.ru

On the influence of heating rate on the process of oxidative pyrolysis of municipal solid waste

Abstract

Background. Converting municipal solid waste (MSW) into energy ranks as one of the priority areas of Russia energy politics. Utilizing thermal processing techniques to recycle MSW, such as dry and oxidative pyrolysis is a cost-effective, environmentally friendly and technically feasible approach. The essential parameters of the pyrolysis process that determine the ratio of the obtained products include the morphological characteristics and heating rate of the feedstock, the concentration of oxygen in the reactor active zone (in case of oxidative pyrolysis), and the operational temperature. Experimental research methods allow us to assess the impact of these factors on the process. Despite its versatility due to its ability to process waste of various fractional compositions and aggregation states, oxidative pyrolysis has not gained widespread acceptance due to the lack of process parameters in installations. Therefore, the study of the oxidative pyrolysis of MSW using modern experimental research tools is relevant.

Materials and methods. The study of the decomposition process of MSW has been carried out using a complex thermal method including thermogravimetry, differential scanning calorimetry and mass spectrometric analysis of gaseous products.

Results. It has been found that increasing the heating rate from 5 to 15°C/min reduces the heat treatment time by a factor of three, but is accompanied by a decrease in the energy efficiency of the process. At a heating rate of 5°C/min, the maximum thermal effect (4250 J/g) and the heat of combustion of pyrolysis gas (11,07 MJ/kg) have been recorded, along with the minimum yield of solid residue (5,86 %). Increasing the heating rate leads to a shift of decomposition temperatures to the high-temperature region and a decrease of the yield of energy-valuable gas components.

Conclusions During the studies, optimal temperature parameters have been determined for a heating rate of 5°C/min to maintain the process of oxidative pyrolysis of waste in thermal reactors with the highest energy yield.

Key words: municipal solid waste, oxidative pyrolysis, synchronous thermal analysis, mass spectrometry, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.2.005-012

Введение. Нарастание темпов утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является одной из ключевых экологических и энергетических задач. С одной стороны, накопление ТКО создает серьезные риски для окружающей среды, с другой – органическая фракция отходов представляет собой потенциальный возобновляемый энергоресурс. Внедрение технологий его исполь-

зования соответствует стратегическим ориентирам энергетической политики России по диверсификации топливно-энергетического баланса. К категории твердых коммунальных отходов причисляются материалы, появляющиеся в жилых зонах в результате потребления товаров частными лицами. Кроме того, в эту категорию входят изделия, которые утратили свою функциональ-

ность в процессе использования для удовлетворения индивидуальных потребностей [1]. ТКО могут содержать следующие основные компоненты: бумагу, картон, текстиль, полимерные материалы, пищевые компоненты, камни, кости, кожу, резину, дерево, черные и цветные металлы, стекло, отсев (менее 15 мм). Информация о типичном морфологическом составе твердых коммунальных отходов для разнообразных климатических регионов представлена в научной и технической литературе [1–3]. Согласно стратегическим направлениям энергетической политики России, в числе приоритетных стоит развитие технологий использования альтернативных источников энергии, в частности на основе термической переработки отходов. Наличие в составе ТКО органических компонентов делает возможным их переработку термическими методами [2], в том числе пиролитическими, дающими возможность получить горючий газ и способствующими решению экологической проблемы с загрязнением окружающей среды [3–5]. Среди методов переработки ТКО термические способы, в частности пиролиз, демонстрируют высокую эффективность. В отличие от прямого сжигания, пиролиз позволяет получать не только энергию, но и ценные химические продукты (горючий газ, смолы), одновременно сокращая объем отходов и минимизируя вредные выбросы. Особый интерес представляет окислительный пиролиз – процесс, протекающий в контролируемой окислительной атмосфере. Его ключевое преимущество – универсальность в отношении морфологического состава и влажности сырья, а также лучшее управление процессом по сравнению с сухим пиролизом.

Несмотря на перспективность применения окислительного пиролиза ТКО, влияние ключевых параметров на его энергетическую эффективность изучено недостаточно. В частности, остается открытым вопрос о воздействии скорости нагрева на выход и качество целевых продуктов – пиролизного газа и твердого остатка. Имеющиеся в литературе данные [2, 5, 6–10] носят фрагментарный характер, особенно для малых концентраций кислорода и типичных для России морфологических составов ТКО. Установление количественных зависимостей между скоростью нагрева и энергетическими характеристиками процесса является необходимым этапом для оптимизации режимов промышленных пиролизных установок.

В связи с этим проведение экспериментальных исследований, ориентированных на установление взаимосвязи между этими факторами и характеристиками пиролизных газов, представляет собой обязательное условие как для разработки методов повышения эффективности пиролизной обработки ТКО, так и для оптимального подбора рабочих параметров пиролизных установок.

Еще одной нерешенной проблемой остается малоизученность физических закономерностей термической деструкции ТКО в условиях варьирования скорости нагрева. Известно, что при увеличении скорости нагрева может наблюдаться как ускорение реакций, так и ухудшение выхода отдельных фракций летучих продуктов.

Методы исследования. Целью настоящего исследования является комплексная оценка влияния скорости повышения температуры на динамику процесса окислительного пиролиза модельной смеси ТКО, имитирующей средний морфологический состав. Для достижения цели использован метод синхронного термического анализа, позволяющий одновременно фиксировать потерю массы образца, тепловые эффекты и состав образующихся газов в режиме реального времени.

Для проведения анализа использовалась имитация ТКО, репрезентативная для типичного морфологического строения отходов в центральной части Российской Федерации. Данная смесь моделировала следующий компонентный состав: бумажные и картонные изделия – 43 % от общей массы; текстильные материалы – 7,5 %; полимерная пленка на основе полиэтилена низкой плотности – 7,5 %; органические пищевые остатки – 42 % по массе. Все компоненты были высушены при 105 °С до постоянной массы, измельчены и перемешаны для получения однородной фракции размером менее 250 мкм. Такая подготовка обеспечила репрезентативность и воспроизводимость результатов.

Исследование выполнено с использованием метода синхронного термического анализа на аппаратно-программном комплексе NETZSCH. Анализ проводился в целях выявления термического поведения материала в условиях контролируемого нагрева и окисления [11]. Методика обеспечивает одновременную регистрацию термогравиметрических, калориметрических и масс-спектрометрических параметров в режиме реального времени.

Комплекс измерительного оборудования содержит: термоанализатор STA 449 F3 Jupiter, предназначенный для одновременной регистрации изменений массы тестируемого образца методом термогравиметрии и тепловых потоков с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии; квадрупольный масс-спектрометр QMS 403 C Aeolos, служащий для контроля состава газообразных продуктов, выделяющихся в процессе пиролиза; модуль импульсного термического анализа PulseTA. Такая конструкция установки позволяет коррелировать кинетику термического разложения с тепловыми эффектами и динамикой выделения отдельных газовых компонентов, обеспечивая комплексную характеристику процесса.

В ходе экспериментальных исследований использовалась дифференциальная сканирующая

калориметрия в режиме контролируемого нагрева. Навески ТКО массой 12–14 мг помещали в корундовый тигель, который устанавливали в измерительную ячейку микровесового сенсора. Эталонная ячейка содержала идентичный пустой тигель, что обеспечивало применение дифференциальной схемы измерений. Данная конфигурация позволила компенсировать фоновые тепловые эффекты, не связанные с процессами в образце, и повысить точность определения энтропийных изменений.

Нагрев осуществляли в камере с электронным программированием температуры в интервале от 20 до 900 °С со скоростью 5, 10 и 15 °С/мин. Тепловой поток регистрировали с помощью высокочувствительных дифференциальных термопар, контактирующих с нижней поверхностью тиглей. Все эксперименты проводили в контролируемой атмосфере аргона с добавкой 1 об% кислорода для моделирования условий слабоокислительной среды.

Прибор STA 449 F3 Jupiter обеспечивал синхронную регистрацию трех ключевых параметров в реальном времени: ТГ кривой, сигнала дифференциальной сканирующей калориметрии и температуры образца. Предельная чувствительность измерений достигала 0,1 мкг для массы и 0,001 °С для температуры. Определение качественного состава продуктов разложения осуществлялось в квадрупольном масс-спектрометре модели QMS 403C Aeolos.

Основу метода составляет измерение парциальных давлений отдельных газов, входящих в газовую смесь. Разделение компонентов смеси достигалось путем ионизации молекул газовой фазы с использованием электрического тока: поток ионов ускоряется в результате воздействия электрического поля и направляется в масс-анализатор из четырех электродов, между которыми возникает комбинированное напряжение с переменной и постоянной составляющими. Работа анализатора заключается в том, что в определенный момент времени измеряются только те ионы, которые имеют строго определенное отношение массы к заряду (M/z). Это обеспечивает возможность селективной идентификации и количественного определения каждого компонента в газовой фазе.

Каждая опытная серия включала минимум три параллельных измерения для корректной статистической обработки. Оборудование предварительно калибровалось стандартными пробами для контроля точности измерений.

Результаты исследования. Результаты термогравиметрического исследования образца ТКО заданного состава в виде графиков приведены на рис. 1–3, где линия 1 – термогравиметрическая кривая (ТГ); линия 2 – кривая дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК); линия 3 – кривая дифференциальной термогравиметрии (ДТГ).

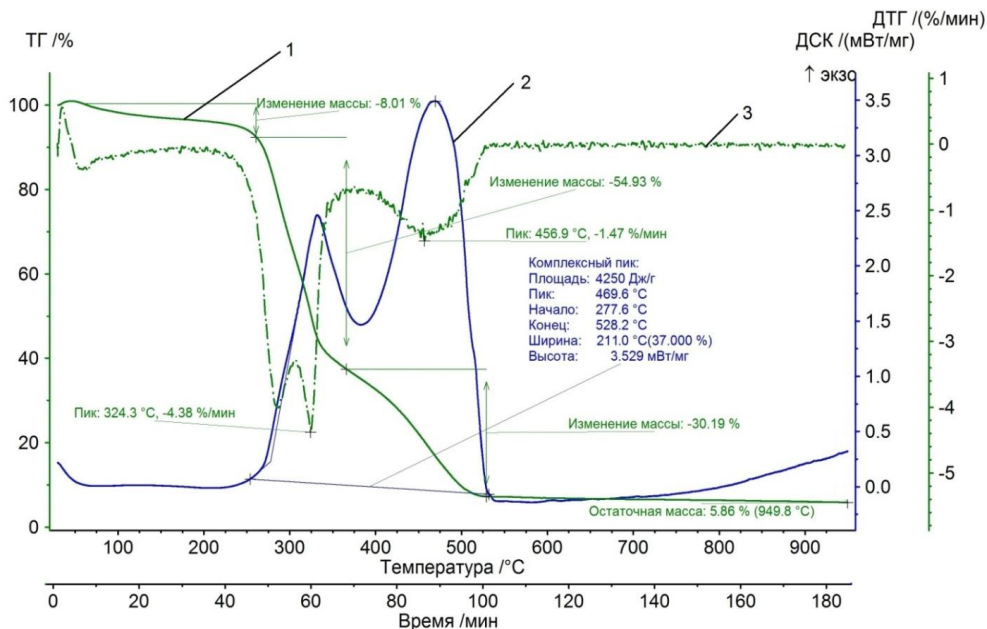


Рис. 1. Графики изменения параметров: 1 – ТГ; 2 – ДСК; 3 – ДТГ при скорости нагрева 5 °С/мин и концентрации 1 % O₂

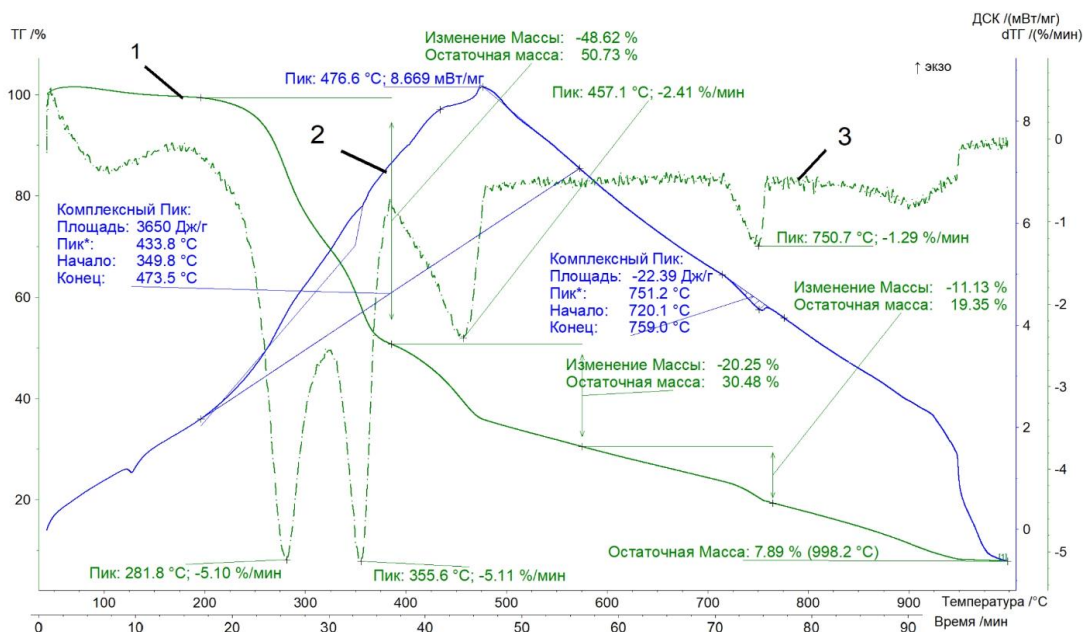


Рис. 2. Графики изменения параметров: 1 – ТГ; 2 – ДСК; 3 – ДТГ при скорости нагрева 10 °С/мин и концентрации 1 % O₂

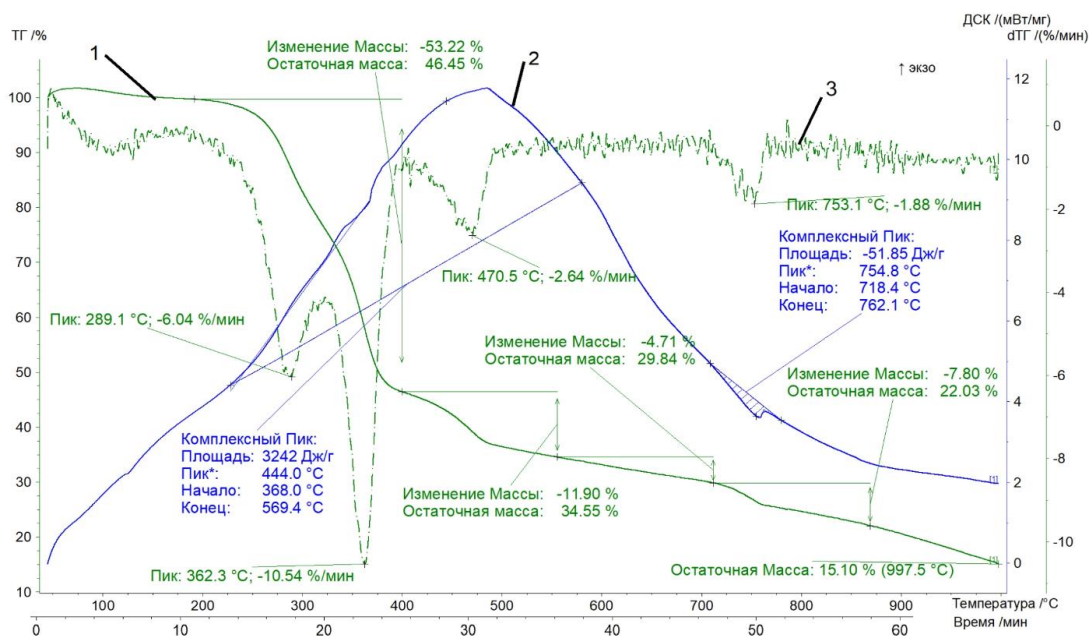


Рис. 3. Графики изменения параметров: 1 – ТГ; 2 – ДСК; 3 – ДТГ при скорости нагрева 15 °С/мин и концентрации 1 % O₂

Анализ результатов термогравиметрии позволил выделить несколько характерных температурных интервалов, демонстрирующих закономерности изменения массы анализируемого вещества в процессе нагрева. В интервале температур от 20 до 245–280 °С отмечается малозначительное снижение массы образца, величина которого колеблется от 3,2 до 8,1 % и зависит от установленной скорости нагрева. Этот эффект объясняется испарением как физически адсорбированной, так и химически связанной воды.

Впоследствии при дальнейшем повышении температуры до 345–385 °С отмечается увеличение скорости потери массы, что свидетельствует о начале процесса термического

разложения органических компонентов, присутствующих в образце твердых коммунальных отходов, и интенсивном выделении газообразных продуктов пиролиза. На графическом представлении (рис. 1–3, кривая 1) дальнейший рост температуры отражается в изменении кривой убыли массы, что обусловлено уменьшением темпа выделения летучих веществ. Существенное замедление скорости потери массы наблюдается при достижении температурного интервала 530–830 °С, что свидетельствует о существенном замедлении термической деградации ТКО. Завершение процесса образования пиролизного газа происходит при температурах 750–900 °С.

Анализ данных дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (рис. 1–3, кривая 2) позволил идентифицировать температурные интервалы протекания эндо- и экзотермических процессов, соответствующих ключевым стадиям термического разложения ТКО. Интерпретация производных термогравиметрических кривых (ДТГ) (рис. 1–3, кривая 3) дала возможность установить характерные температуры максимальной скорости потери массы, что коррелирует с пиками выхода летучих продуктов в ходе пиролиза. Сводные количественные результаты синхронного термического анализа (СТА) представлены в табл. 1.

Анализ данных, содержащихся в табл. 1, показывает, что повышение скорости нагрева вызывает смещение величины максимальной скорости потери массы образца в сторону более высоких температур (с 324,3 °С при скорости нагрева 5 °С/мин до 362,3 °С при скорости нагрева 15 °С/мин). Максимальное значение теплового эффекта при пиролизе, достигающее 4250 Дж/г, и минимальное количество твердого остатка (5,86 %) зафиксированы при скорости нагрева 5 °С/мин.

Максимальная скорость потери массы наблюдается на пике сдвига, что говорит о большей интенсивности реакций, но менее полной их переработке. Это подтверждается снижением доли летучих и одновременным

увеличением твердого остатка. Температурный максимум основного экзотермического эффекта для всех режимов укладывается в диапазон 345–385 °С.

На рис. 4 представлен сопоставительный анализ термогравиметрических данных, полученных в ходе пиролиза исследуемых образцов ТКО при скоростях нагрева 5, 10 и 15 °С/мин. Очевидно, что все кривые имеют одинаковый характер.

Варьирование скорости нагрева оказывает влияние на положение кривых относительно оси температуры. Наблюдается закономерность, заключающаяся в том, что увеличение скорости нагрева твердой фазы от 5 °С/мин до 15 °С/мин обуславливает значительное уменьшение общей продолжительности термического разложения отходов приблизительно в три раза, что, с одной стороны, может способствовать интенсификации процесса в промышленных условиях, а с другой – сопровождается ростом остатка негорючей твердой фазы (зола, несгоревших частиц) и снижением выхода летучих энергетически ценных компонентов.

Увеличение массовой доли образующегося пиролизного остатка (с 5,86 % при 5 °С/мин до 15,10 % при 15 °С/мин) сопровождается снижением теплового эффекта основного пика разложения (345–385 °С) и суммарной теплоты сгорания газовой смеси.

Таблица 1. Результаты термического анализа образца ТКО

Скорость нагрева, °С/мин	Максимальная скорость потери массы (%/мин) при температуре (°С)	Температура пиков тепловыделения, °С	Остаточная масса, %	Тепловой эффект пиролиза, Дж/г
5	-4,38 (324,3 °С)	324,3; 469,6; 949,8	5,86	4250
10	-9,86 (355,6 °С)	281,8; 355,6; 750,7	7,89	3650
15	-16,55 (362,3 °С)	289,1; 362,3; 754,8	15,10	3242

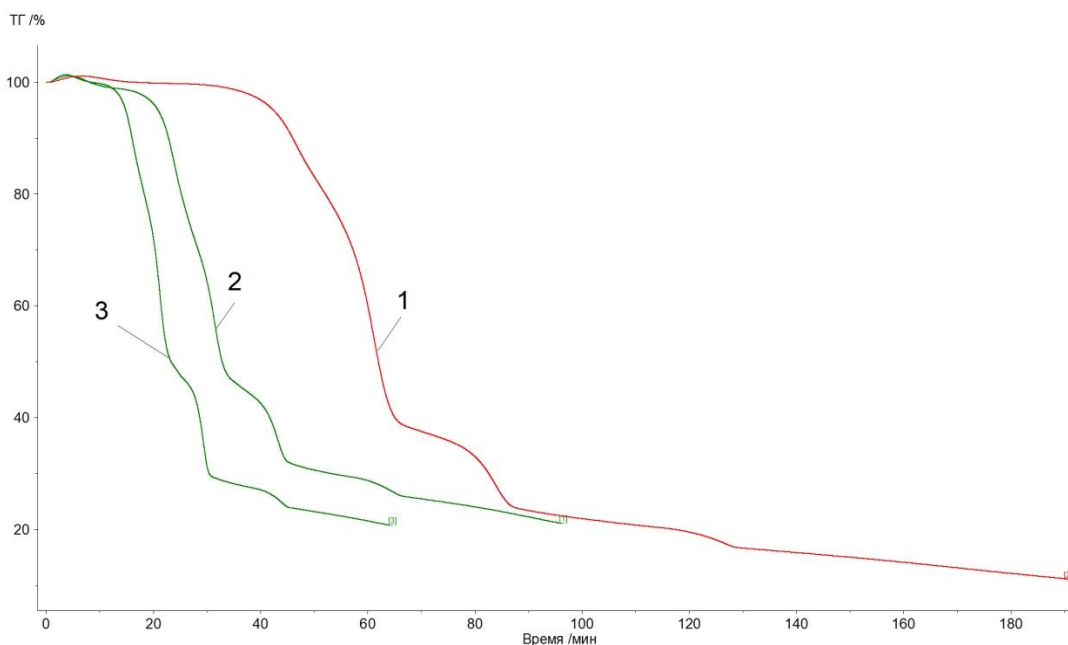


Рис. 4. Изменение массы ТКО при различных скоростях нагрева: 1 – 5 °С/мин; 2 – 10 °С/мин; 3 – 15 °С/мин

Анализ качественного состава пиролизного газа был осуществлен посредством обработки данных, полученных с масс-спектрометра. Эти данные отражают взаимосвязь между ионным током и массовыми числами. Для идентификации компонентов газовой смеси использовалась спектральная библиотека NIST, содержащая стандартизированные масс-спектры различных химических веществ.

Анализ результатов масс-спектрометрических данных позволил установить качественный состав пиролизного газа. Его основу составляют: водород (H_2 , $m/z = 2$); метан (CH_4 , $m/z = 16$); пары воды (H_2O , $m/z = 18$); оксид углерода (CO , $m/z = 28$) и диоксид углерода (CO_2 , $m/z = 44$). Сигналы с массовыми числами 12 (атомарный углерод), 14 (азот или CH_2 -группа), 15 (CH_3 -группа) и 17 (гидроксильная группа) были идентифицированы и их вклад в интенсивность основных пиков учтен с использованием библиотеки масс-спектров NIST.

Для количественного анализа состава пиролизного газа применялся метод внутреннего стандарта [12, 13], основанный на сравнении интенсивностей сигналов компонентов смеси с калибровочным газом. Расчет массовых долей выполнялся по методике А.Н. Козлова и А.В. Кейко [14].

Анализ полученных результатов (табл. 2) показывает, что основными горючими компонентами газа являются метан и оксид углерода, при этом доля водорода незначительна (<0,1 %).

Таблица 2. Состав пиролизного газа, масс. %

Скорость нагрева	CH_4	CO	H_2O	CO_2	H_2
5	12,9	44,66	13,36	28,98	0,1
10	10,6	28,91	36,2	24,2	0,09
15	8	26,48	36,79	28,67	0,06

Определение теплотворной способности пиролизного газа производилось на основе принципа аддитивности компонентов:

$$Q_n^p = Q_{CH_4} g_{CH_4} + Q_{CO} g_{CO} + Q_{H_2} g_{H_2}, \quad (1)$$

где Q_{CH_4} , Q_{CO} , Q_{H_2} – низшая теплота сгорания метана, монооксида углерода, водорода, Дж/кг; g_{CH_4} , g_{CO} , g_{H_2} – массовая доля перечисленных выше компонентов.

Результаты расчета низшей теплоты сгорания газа приведены в табл. 3.

Таблица 3. Низшая теплота сгорания пиролизного газа в зависимости от скорости нагрева образца

Скорость нагрева, °С/мин	Теплота сгорания, МДж/кг
5	11,07
10	7,36
15	6,93

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что трехкратное увеличение скорости нагрева влечет за собой уменьшение энергетического потенциала пиролизного газа в 1,6 раза. Таким образом, данное наблюдение указывает на обратную зависимость между скоростью нагрева и энергетической ценностью получаемого пиролизного газа. Максимальное значение теплоты сгорания газа в 11,07 МДж/кг получено при скорости нагрева 5 °С/мин. Полученные данные согласуются с результатами исследований, приведенных в литературных источниках [6–10].

Выводы. Установлено, что при окислительном пиролизе ТКО со средним морфологическим составом и содержанием кислорода 1 % скорость нагрева критически влияет на энергетическую эффективность процесса.

Экспериментальные данные показывают, что интенсификация нагрева в диапазоне от 5 до 15 °С/мин приводит к более чем трехкратному уменьшению временных затрат на пиролиз. Вместе с тем данное ускорение снижает тепловой эффект на 24 %. Наблюдается увеличение количества твердого остатка после завершения процесса. Кроме того, образующаяся газовая фаза характеризуется пониженной теплотой сгорания.

Экспериментально подтверждено, что при более низких скоростях нагрева выход летучих энергетически ценных компонентов (CH_4 , CO , H_2) максимален, а суммарная теплота сгорания пиролизного газа выше, что делает такие режимы предпочтительными для практического применения в энергетических технологиях.

На основании проведенных исследований рекомендованы оптимальные параметры режима окислительного пиролиза для получения пиролизного газа с максимально возможными энергетическими характеристиками при минимуме твердого остатка: низкие скорости нагрева при контролируемом содержании кислорода.

Перспективным направлением дальнейших исследований является варьирование концентрации кислорода, расширение диапазона температур и анализ морфологической специфики различных видов ТКО, а также масштабирование процесса до промышленных установок.

Список литературы

1. ИТС 15-2021 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов)» [Электронный ресурс] // Бюро наилучших доступных технологий: официальный сайт. URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1667&etkstructure_id=1872 (дата обращения 1.11.2025).
2. Тугов А.Н. Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор) // Теплоэнергетика. – 2021. – № 1. – С. 3–20.
3. Переработка твердых бытовых отходов методом пиролиза. Обз. информ. – М.: ЦНИИТЭИМС, 1983. – 40 с.

4. **Термическая** утилизация твердых бытовых отходов. Концепция НИИ Стромкомполит. – Красноярск, 2006. – 15 с.

5. **Пиролитические** методы термической переработки твердых коммунальных отходов / В.В. Хасхачих, О.М. Ларина, Г.А. Сычев и др. // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 467–480.

6. **Экспериментальное** исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, К.В. Аксенчик, В.А. Артемьева // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 3. – С. 14–19. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.014-019.

7. **Экспериментальное** исследование процесса термической деструкции твердых коммунальных отходов / Д.А. Долинин, О.Б. Колибаба, А.И. Сокольский, Р.Н. Габитов // Повышение энергоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. симпозиума. – Киров: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021. – Т. 1. – С. 182–186. DOI: 10.37816/eeste-2021-1-182-186.

8. **Исследование** процесса окислительного пиролиза смесей нефтяного и растительного сырья / Е.Г. Горлов, А.В. Шумовский, Ю.П. Ясьян и др. // Химия твердого топлива. – 2019. – № 3. – С. 41–47. DOI: 10.1134/S0023117719030022.

9. **Шитиков Н.В., Нисковская М.Ю.** Окислительный пиролиз в технологии совместной переработки отходов агропромышленного комплекса и нефтяных остатков в химическую продукцию // Научное обозрение. Педагогические науки. – 2019. – № 3-3. – С. 110–114.

10. **Алексеева Т.С., Иванов А.В.** Сравнительный анализ эмпирических моделей окислительного пиролиза древесины // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2015. – № 4. – С. 74–85.

11. **Уэндландт У.** Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 527 с.

12. **Открытая** база данных масс-спектров NIST. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

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

14. **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. ITS 15-2021 Информационно-технологический справочник по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов)» [ITS 15-2021 Information and technical reference book on the best available technologies «Waste disposal and neutralization (except thermal methods)»]. *Byuro nailuchshikh dostupnykh tekhnologiy: ofitsial'nyy sayt* [Bureau of Best Available Technologies: official website]. URL: https://burondt.ru/NDT/NDT_Docs_Detail.php?UrlId=799&etkstructure_id=1872 (date of access 02/18/2025)

2. Tugov, A.N. *Sovremennye tekhnologii termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov i perspektivy ikh realizatsii v Rossii (obzor)* [Modern technologies for thermal processing of municipal solid waste and prospects for their implementation in Russia (review)]. *Teploenergetika*, 2021, no. 1, pp. 3–20.

3. *Pererabotka tverdykh bytovykh otkhodov metodom piroliza. Obzornaya informatsiya* [Processing of solid municipal waste by the pyrolysis method. Review. Information]. Moscow: TsNIITEIMS, 1983. 40 p.

4. *Termicheskaya utilizatsiya tverdykh bytovykh otkhodov. Kontseptsiya NII Stromkompozit* [Thermal recycling of municipal solid waste. Concept of the Research Institute Stromkompozit]. Krasnoyarsk, 2006. 15 p.

5. Khaskhachikh, V.V., Larina, O.M., Sychev, G.A., Gerasimov, G.Ya., Zaychenko, V.M. *Piroliticheskie metody termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov* [Pyrolytic methods of thermal processing of municipal solid waste]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 467–480.

6. Gabitov, R.N., Kolibaba, O.B., Aksechik, K.V., Artem'eva, V.A. *Eksperimental'noe issledovanie oksidativnogo piroliza tverdykh bytovykh otkhodov* [Experimental study of oxidative pyrolysis of municipal solid waste]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 14–19. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.014-019.

7. Dolinin, D.A., Kolibaba, O.B., Sokol'skiy, A.I., Gabitov, R.N. *Eksperimental'noe issledovanie protsessy termicheskoy destruktzii tverdykh kommunal'nykh otkhodov* [Experimental study of the process of thermal destruction of municipal solid waste]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma «Povyshenie energoresursoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti protsessov i apparatov khimicheskoy i smezhnykh otrasley promyshlennosti»* [Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Symposium "Improving energy and resource efficiency and environmental safety of processes and equipment in the chemical and related industries"]. Kirov, 2021, vol. 1, pp. 182–186. DOI: 10.37816/eeste-2021-1-182-186.

8. Gorlov, E.G., Shumovskiy, A.V., Yas'yan, Yu.P., Niskovskaya, M.Yu., Ol'gin, A.A. *Issledovanie protsessy oksidativnogo piroliza smesey neftyanogo i rastitel'nogo syr'ya* [Investigation of the process of oxidative pyrolysis of mixtures of petroleum and vegetable raw materials]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2019, no. 3, pp. 41–47. DOI: 10.1134/S0023117719030022.

9. Shitikov, N.V., Niskovskaya, M.Yu. *Oksidativnyy piroliz v tekhnologii sovместной pererabotki otkhodov agropromyshlennogo kompleksa i neftyanykh ostatkov v khimicheskuyu produktsiyu* [Oxidative pyrolysis in the technology of joint processing of waste from the agro-industrial complex and oil residues into chemical products]. *Nauchnoe obozrenie. Pedagogicheskie nauki*, 2019, no. 3-3, pp. 110–114.

10. Alekseeva, T.S., Ivanov, A.V. *Sravnitel'nyy analiz empiricheskikh modeley oksidativnogo piroliza drevesiny* [Comparative analysis of empirical models of oxidative pyrolysis of wood]. *Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS Rossii»*, 2015, no. 4, pp. 74–85.

11. Wendlandt, W. *Termicheskie metody analiza* [Thermal methods of analysis]. Moscow: Mir, 1978. 527 p.

12. *Otkrytaya baza dannykh mass-spektrov NIST* [An open database of mass spectra of NIST]. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

13. Lebedev, A.T. *Mass-spektrometriya organicheskoy khimii* [Mass spectrometry of organic chemistry]. – Moscow: BINOM, 2003. 493 p.

14. 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.