

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: tevp@tvp.ispu.ru

Илья Игоревич Феоктистов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», аспирант кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: FeoktistovII@mpei.ru

Сергей Николаевич Петин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: PetinSN@mpei.ru

Анна Александровна Валинеева

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: ValineevaAA@mpei.ru

Исследование термического разложения твердых коммунальных отходов на основе моделирования в ПК ASPEN PLUS

Авторское резюме

Состояние вопроса. Актуальной задачей современности, требующей незамедлительного решения, является утилизация и обезвреживание твердых коммунальных отходов, объемы которых ежегодно растут. Перспективным экологически безопасным методом переработки твердых коммунальных отходов является пиролиз, позволяющий получить комбинацию твердых, жидких и газообразных продуктов в различных пропорциях за счет изменения рабочих параметров процесса. На практике применяются два основных метода пиролиза – «сухой» и окислительный, от организации и характера протекания которых зависит снижение объемов отходов и выбросов парниковых газов, характеристики и стоимость получаемого газа и др. На процесс пиролиза и, следовательно, на режим работы пиролизной установки оказывает влияние ряд факторов, таких как температурный уровень процесса, содержание кислорода в газе, поступающем в реактор, влажность и морфологический состав исходного сырья. Оценить степень воздействия на процесс и взаимного влияния этих факторов позволяет привлечение методов математического моделирования. Целью настоящего исследования является прогнозирование выхода и теплоты сгорания продуктов пиролиза твердых коммунальных отходов среднего морфологического состава в зависимости от исходной влажности твердых коммунальных отходов и температуры процесса на основе математического моделирования.

Материалы и методы. В качестве метода исследования выбран метод имитационного математического моделирования с использованием программной среды Aspen Plus.

Результаты. Разработана имитационная модель «сухого» и окислительного пиролиза твердых коммунальных отходов усредненного морфологического состава, позволяющая оценить влияние удельного теплосжигания сырья в процессе пиролиза и исходной влажности твердых коммунальных отходов на режимные параметры процесса: состав, удельный выход, теплоту сгорания и температуру пиролизного газа. Установлено, что в результате «сухого»

пиролиза твердых коммунальных отходов среднего морфологического состава наиболее калорийный газ с теплотой сгорания 8133 кДж/м^3 образуется при температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности сырья 0% , а самый низкокалорийный газ ($Q_{\text{H}} = 3092 \text{ кДж/м}^3$), но с самым большим удельным выходом получается при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности твердых коммунальных отходов 60% ; в результате окислительного пиролиза наиболее калорийный газ с теплотой сгорания 4141 кДж/м^3 образуется при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности сырья 0% , а самый низкокалорийный газ, имеющий $Q_{\text{H}} = 490 \text{ кДж/м}^3$, соответствует температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности сырья 60% ; наибольший удельный выход газа соответствует влажности 40% и температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

Выводы. Разработанная имитационная модель «сухого» и окислительного пиролиза твердых коммунальных отходов показала нецелесообразность проведения пиролиза твердых коммунальных отходов исследуемого состава при исходной влажности выше 40% .

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, пиролиз, влажность сырья, продукты пиролиза, режимные параметры процесса, имитационное моделирование

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

Ilya Igorevich Feoktistov

National Research University MPEI, Postgraduate Student of Innovative Technologies in High-tech Industries Department, Russia, Moscow, e-mail: FeoktistovII@mpei.ru

Sergey Nikolaevich Petin

National Research University MPEI, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Innovative Technologies in High-Tech Industries Department, Russia, Moscow, e-mail: PetinSN@mpei.ru

Anna Aleksandrovna Valineeva

National Research University MPEI, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Senior Lecturer of Innovative Technologies in High-Tech Industries Department, Russia, Moscow, e-mail: ValineevaAA@mpei.ru

Study of thermal destruction of municipal solid waste based on ASPEN PLUS modeling

Abstract

Background. A pressing issue of our time that requires immediate solution is the disposal and neutralization of municipal solid waste (MSW), the volumes of which are increasing annually. Pyrolysis is a promising environmentally friendly method of processing municipal solid waste. It allows obtaining a combination of solid, liquid and gaseous products in various proportions by changing the operating parameters of the process. In practice two main pyrolysis methods are used, they are “dry” and oxidative. Their organization and nature determine the reduction of waste volumes and greenhouse gas emissions, the characteristics and cost of the product gas, etc. A number of factors such as the temperature level of the process, the oxygen content in the gas entering the reactor, moisture and morphological composition of the feedstock affect the pyrolysis process and, consequently, the operating mode of the pyrolysis unit. Mathematical modeling methods allow assessing the degree of impact on the process and the mutual influence of these factors. The aim of this study is to predict the yield and heat of combustion of MSW pyrolysis products of average morphological composition depending on the initial moisture content of MSW and the process temperature based on mathematical modeling.

Materials and methods. The method of simulation mathematical modeling using the Aspen Plus software environment has been chosen as the research method.

Results. A simulation model of “dry” and oxidative pyrolysis of average morphological composition municipal solid waste has been developed. It allows assessing the influence of the specific heat absorption of raw materials during the pyrolysis process and the initial moisture content of municipal solid waste on the process parameters: composition, specific yield, heat of combustion and temperature of the pyrolysis gas. It has been established that as a result of “dry” pyrolysis of MSW of average morphological composition, the most calorific gas with a combustion heat of 8133 кДж/м^3 is formed at a temperature of $300 \text{ }^\circ\text{C}$ and a feedstock moisture content of 0% , and the lowest calorific gas ($Q_{\text{H}} = 3092 \text{ кДж/м}^3$) but with the highest specific yield, is obtained at a temperature of $600 \text{ }^\circ\text{C}$ and a MSW moisture content of 60% . As a result of oxidative pyrolysis, the most calorific gas with a combustion heat of 4141 кДж/м^3 is formed at a temperature of $600 \text{ }^\circ\text{C}$ and a feedstock moisture content of 0% , and the lowest calorific gas with $Q_{\text{H}} = 490 \text{ кДж/м}^3$ corresponds to a temperature of $600 \text{ }^\circ\text{C}$ and a feedstock moisture content of 60% . The highest specific gas yield corresponds to a moisture content of 40% and a temperature of $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

Conclusions. The developed simulation model of “dry” and oxidative pyrolysis of municipal solid waste has shown the inexpediency of MSW of the studied composition at an initial moisture content above 40% .

Key words: municipal solid waste, pyrolysis, raw material moisture, pyrolysis products, process parameters, simulation modeling

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.005-011

Введение. Актуальной задачей современности, требующей незамедлительного решения, является утилизация и обезвреживание твердых коммунальных отходов (ТКО), объемы которых интенсивно растут. Так, например, за десятилетний период, с 2012 по 2021 год, их количество увеличилось в 1,37 раза, с 255,8 до 349,5 млн м³.

Государственная политика в сфере обращения с ТКО направлена на сокращение доли их полигонного захоронения и увеличение доли их переработки¹. Широкое распространение на сегодняшний день получили термические методы переработки ТКО, применение которых не только существенно сокращает объемы отходов, но и позволяет получать топливо, тепловую и электрическую энергию, а также сырье для химической отрасли [1, 2].

Перспективным методом обращения с ТКО с точки зрения как экологической безопасности, так и получения вторичных полезных продуктов считается пиролиз, важным преимуществом которого является возможность переработки разных видов отходов, включая промышленные, коммунальные и медицинские [3–5].

Пиролитические методы предусматривают:

- термодеструкцию подготовленных отходов в реакторе для получения пирогаза и пиролизного масла и твердого остатка;

- конденсацию и сепарацию газовой фракции с получением жидкой фракции и пирогаза;

- очистку пирогаза от соединений хлора, фтора, серы, цианидов в целях повышения его экологических показателей и энергоэффективности;

- сбор и сжигание очищенного пирогаза в топке котла-утилизатора для получения пара, горячей воды, электроэнергии или использование пирогаза для производства продукции;

- сбор пиролизного масла и твердого углеродного остатка².

Наиболее значимыми параметрами процесса, определяющими количественное соотношение получаемых твердых, жидких и газообразных продуктов, являются конечная температура процесса и скорость нагрева сырья.

На практике применяются два основных метода пиролиза – «сухой» и окислительный. Окислительный пиролиз отличается присутствием небольшого количества кислорода в рабочем пространстве установки, что приводит к частичному сжиганию отходов. Влияние содержания кислорода на теплоту сгорания пиролизного газа экспериментально исследовано в [6].

От организации и характера протекания процесса пиролиза зависят: снижение объемов отходов и выбросов парниковых газов; характеристики и стоимость получаемого пиролизного газа и др.

На процесс окислительного пиролиза оказывает влияние ряд факторов, таких как

скорость нагрева, содержание кислорода в газе, поступающем в реактор, влажность и морфологический состав исходных ТКО.

Содержание кислорода в процессе окислительного пиролиза оказывает влияние на теплоту сгорания пиролизного газа и величину теплового эффекта. Изменение скорости нагрева приводит к изменению количественного состава пиролизного газа и его теплоты сгорания. Морфологический состав ТКО определяет состав и теплоту сгорания получаемого топлива. Наличие влаги в ТКО, поступающих в реактор, может повлиять на стабильность и управляемость процесса пиролиза. Колебания содержания влаги могут привести к колебаниям температуры, состава получаемого газа и общей стабильности процесса, что усложняет поддержание стабильных режимных параметров.

Оценить степень воздействия этих факторов на протекание процесса позволяют методы физического и математического моделирования, которые взаимно дополняют друг друга. Физическое моделирование требует проведения большого количества лабораторных экспериментов в целях выявления основных технологических характеристик процесса (выход газообразной, твердой и жидкой фракций, температурный режим, тепловые эффекты и др.). Сократить трудоемкость лабораторных исследований позволяет численный эксперимент с использованием методов математического моделирования.

Целью настоящего исследования является прогнозирование выхода продуктов пиролиза ТКО усредненного морфологического состава (бумага – 43 %, пищевые отходы – 42 %, текстильные отходы – 7,5 %, полимерная пленка – 7,5 %) и их энергетической ценности в зависимости от исходной влажности сырья и температуры процесса на основе математического моделирования.

Методы исследования. В качестве метода исследования выбран метод имитационного моделирования, используемый при изучении сложных систем с большим числом элементов и связей между ними. Для разработки стационарной модели, позволяющей прогнозировать выход продуктов пиролиза ТКО и их энергетическую ценность, был использован современный инструмент моделирования Aspen Plus. Данный инструмент получил широкое распространение для моделирования теплотехнологических процессов, в том числе деструкции отходов различного вида [7, 8]. Aspen Plus эффективен для оптимизации рабочих параметров процесса пиролиза, таких как скорость нагрева, температура, время пребывания твердого вещества в реакторе, фракционный состав сырья и др. [9, 10].

¹ Паспорт национального проекта «Экология» // МинПрироды России. – URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/hp_ecology/passport_ecology.pdf (дата обращения: 16.12.2024).

² ИТС 9-2020 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: официальный сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573338441> (дата обращения 18.12.2023).

При моделировании процесса пиролиза ТКО приняты следующие допущения:

1. Процесс является устойчивым и изотермическим.

2. Элементный состав ТКО включает в себя: углерод, водород, кислород, азот и серу. Наличие хлора незначительно, поэтому в расчетах он не учитывается.

3. Пиролиз происходит мгновенно. Летучие продукты включают в себя: H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O .

4. Твердый углеродный остаток содержит только углерод и золу.

В качестве входных параметров в модели были использованы результаты анализа среднего морфологического и элементного состава ТКО. Моделирование «сухого» и окислительного пиролиза ТКО с коэффициентом расхода окислителя 0,24 проводили при давлении 0,1 МПа и температуре 600 °С, характеризующейся окончанием выхода летучих соединений при деструкции ТКО усредненного морфологического состава [11]. Исходную влажность ТКО, поступающих в реактор, принимали в диапазоне 0–60 %.

В таблице приведен элементный и технический анализ образца ТКО при значениях влажности (W): 0; 10; 20; 30; 40; 60 %.

Результаты состава ТКО при различных значениях влажности

Компонент	Содержание компонента, %						
	C	46,20	41,58	36,96	32,34	27,72	23,10
H	7,20	6,48	5,76	5,04	4,32	3,60	2,88
O	38,90	35,01	31,12	27,23	23,34	19,45	15,56
N	1,60	1,44	1,28	1,12	0,96	0,80	0,64
A	6,10	5,49	4,88	4,27	3,66	3,05	2,44
W	0,00	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00
Сумм	100	100	100	100	100	100	100

Технический состав

FC	25,49	22,94	20,39	17,84	15,30	12,75	10,20
VM	68,41	61,57	54,73	47,89	41,04	34,20	27,36
Ash	6,10	5,49	4,88	4,27	3,66	3,05	2,44
Moisture	0,00	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00
Сумм	100	100	100	100	100	100	100

Примечания: FC – фиксированный углерод; VM – выход летучих; Ash – зольность; Moisture – влажность.

Схема ASPEN-модели «сухого» и окислительного пиролиза ТКО представлена на рис. 1, а, б.

Для имитации деструкции исходного сырья (ТКО) был выбран реактор RYIELD, а для описания разделения твердых веществ использована нестехиометрическая модель расщепителя Гиббса, основанная на равновесии свободной энергии (реактор Гиббса – RGIBBS).

В модели процесс пиролиза представляется состоящим из двух последовательных этапов. На

первом этапе (в блоке DECOMP) происходит декомпозиция (пиролиз) ТКО на составные компоненты, на втором этапе (в блоке TOREF) – собственно «окислительный пиролиз» (начальная стадия газификации) как неполное горение, т.е. химическое взаимодействие компонентов с окислителем. В блоке SPLIT происходит разделение продуктов газификации на поток пирогаза и поток твердых продуктов.

Блок-калькулятор COMBUST (тип CALCULATOR) вычисляет состав потока, направляемого после пиролиза на газификацию, иными словами, из блока DECOMP в блок TOREF. Отдельным потоком, требующим ввода параметров при моделировании окислительного пиролиза, является поток AIR газифицирующего агента.

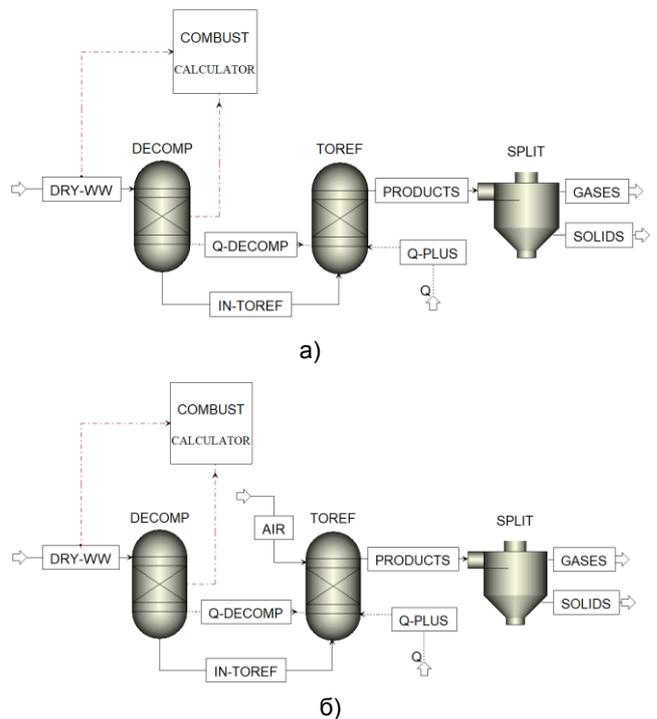


Рис. 1. Схема Aspen-модели процесса пиролиза ТКО: а – «сухой» пиролиз; б – окислительный пиролиз

В блоке COMBUST рассчитываются массовые доли компонентов потока, идущих в блок TOREF. В качестве входных данных используются состав (массив ULT) и процент влажности (величина WATER) ТКО. Рассчитываются массовая доля вещества FACT и воды H_2O , после чего определяется в массовых долях состав потока, покидающего блок пиролиза и направляемого в блок газификации.

Расчет осуществляется посредством команд, которые внесены в блоке COMBUST на языке программирования FORTRAN:

$$\begin{aligned}
 FACT &= (100 - WATER) / 100 \\
 H_2O &= WATER / 100 \\
 ASH &= ULT (1) / 100 * FACT \\
 CARB &= ULT (2) / 100 * FACT \\
 H_2 &= ULT (3) / 100 * FACT \\
 N_2 &= ULT (4) / 100 * FACT \\
 O_2 &= ULT (5) / 100 * FACT
 \end{aligned}$$

С помощью блока-калькулятора COMBUST устанавливаются значения для блока DECOMP, поэтому калькулятор запускается перед работой блока декомпозиции.

Модель позволяет определить удельный выход, низшую теплоту сгорания, температуру и состав пиролизного газа в процессе «сухого» и окислительного пиролиза в зависимости от влажности исходных ТКО и удельного теплоподвода в реактор. С помощью имитационной модели было изучено влияние температуры пиролиза и влажности ТКО на режимные параметры процесса.

Основные результаты. Результаты расчетных исследований на Aspen-модели «сухого» пиролиза ТКО усредненного морфологического состава при значениях влажности исходного сырья 0, 20, 40 и 60 % представлены в виде графиков на рис. 2–4.

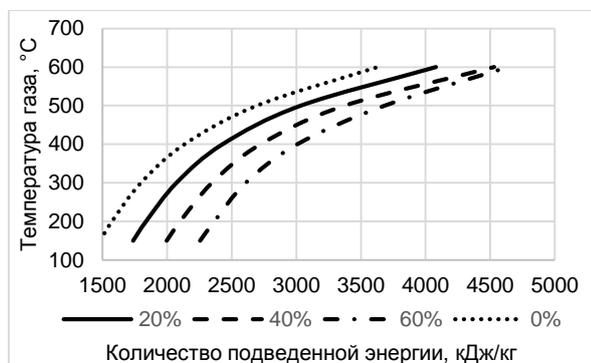


Рис. 2. Зависимость температуры пиролизного газа от удельного теплопоглощения при различных значениях влажности ТКО в процессе «сухого» пиролиза

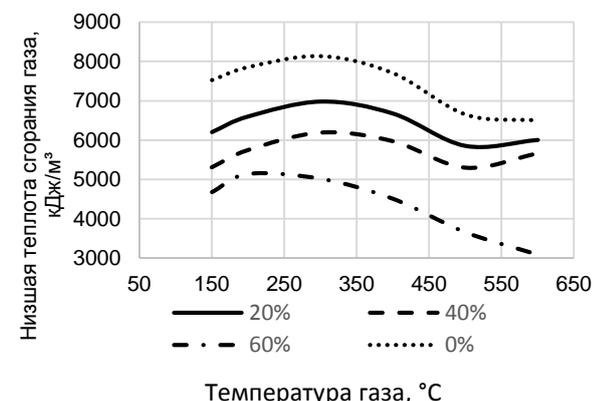


Рис. 3. Зависимость теплоты сгорания пиролизного газа от температуры при различных значениях влажности ТКО в процессе «сухого» пиролиза

Анализ полученных данных (рис. 2) показывает, что все кривые в области температур от 150 до 400 °C имеют одинаковый характер. Снижение влажности ТКО на 20 % приводит к уменьшению удельного теплопоглощения в 1,1–1,2 раза при постоянной температуре газа. При температуре свыше 400 °C кривые, соответствующие влажности 0; 20 и 40 %, сохраняют свой характер, в то время как кривая,

соответствующая влажности 60 %, изменяет свое направление, приближаясь к линии 40 %. Это связано с тем, что количество образовавшегося пирогаза с увеличением влажности ТКО уменьшается, и, чтобы его нагреть до требуемой температуры, необходимо подвести меньшее количество теплоты.

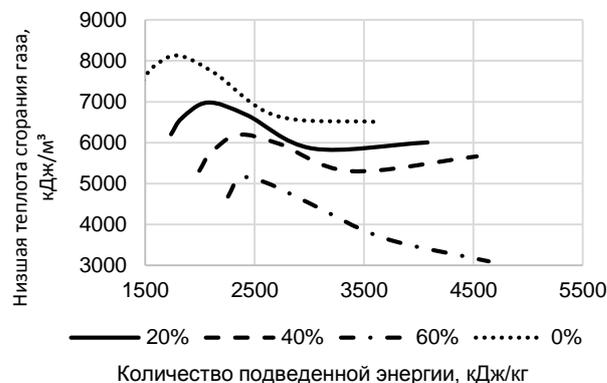


Рис. 4. Зависимость теплоты сгорания пиролизного газа от удельного теплопоглощения при различных значениях влажности ТКО в процессе «сухого» пиролиза

Анализ графических зависимостей на рис. 3, 4 показывает, что повышение влажности сырья приводит к снижению теплоты сгорания пирогаза при постоянной температуре процесса, что обусловлено увеличением выхода водяных паров в составе газа. Теплота сгорания пирогаза снижается с 8133 кДж/м³ при влажности сырья 0 % до 5139 кДж/м³ при влажности 60 % (рис. 3). Кривые, соответствующие влажности 0; 20 и 40 %, идентичны.

Влияние температуры процесса на величину теплоты сгорания пирогаза обусловлено тем, что при различных температурах протекают различные химические реакции с образованием различных газообразных продуктов. Пиковое значение теплоты сгорания пирогаза имеет место при температуре 300 °C, которая соответствует максимальному выходу наиболее калорийного газа – метана. При последующем повышении температуры доля метана в пирогазе сокращается. Это связано с протеканием вторичных реакций и конверсией метана. Дальнейшее увеличение влажности ТКО приводит к резкому снижению теплоты сгорания газа и изменению характера зависимости $Q_{pн}(T)$ (линия 60 %), что обусловлено снижением доли метана в составе газа. Пиковое значение теплоты сгорания смещается в область более низких температур и соответствует температуре 200 °C.

Таким образом, анализ графиков показывает нецелесообразность проведения «сухого» пиролиза ТКО исследуемого состава, имеющего влажность более 40 %. Полученные результаты согласуются с данными других авторов [12].

Расчетами установлено, что в результате «сухого» пиролиза ТКО исследуемого состава

наиболее калорийный газ с теплотой сгорания 8133 кДж/м^3 образуется при температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности сырья 0% , удельное теплотеплопоглощение при этом составляет 1798 кДж/кг , а удельный выход газа – $1,47 \text{ м}^3/\text{кг}$. Самый «бедный» газ ($Q_{\text{pн}} = 3092 \text{ кДж/м}^3$), но с самым большим удельным выходом $4,29 \text{ м}^3/\text{кг}$ получается при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности ТКО 60% , удельное теплотеплопоглощение при этом составляет 4640 кДж/кг .

На рис. 5–7 представлены результаты аналогичных исследований, выполненных на Aspen-модели для окислительного пиролиза при коэффициенте расхода окислителя $0,24$.

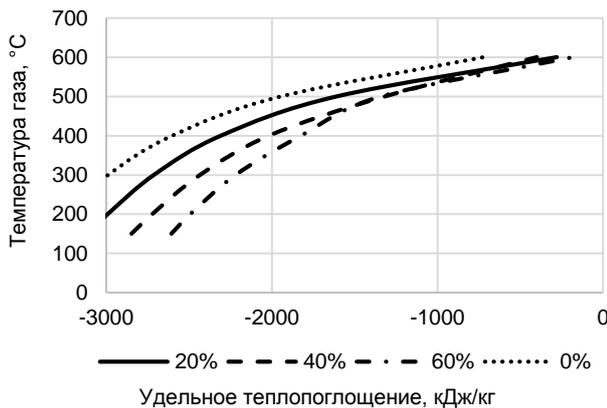


Рис. 5. Зависимость температуры пиролизного газа от удельного теплотеплопоглощения при различных значениях влажности ТКО в процессе окислительного пиролиза

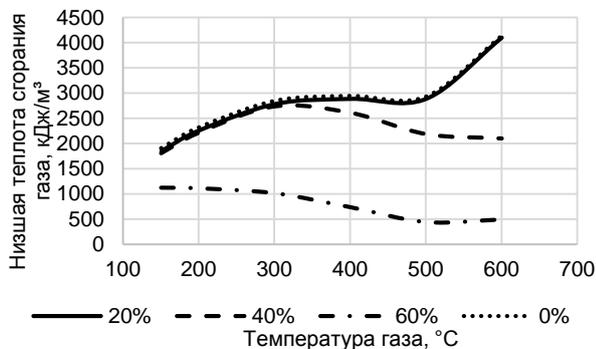


Рис. 6. Зависимость теплоты сгорания пиролизного газа от температуры при различных значениях влажности ТКО в процессе окислительного пиролиза

Окислительный пиролиз сопровождается протеканием как эндотермических, так и экзотермических реакций, что нашло отражение в графиках на рис. 5, 7. Отрицательные значения теплотеплопоглощения обозначают, что в данных условиях преимущественно протекают реакции с выделением тепла, поэтому для установления требуемой температуры тепло в модели условно «отводится».

Характер кривых на рис. 5 аналогичен результатам, представленным на рис. 2. Однако в данном случае линии влажности 40% и 60% пересекают вышерасположенные кривые.

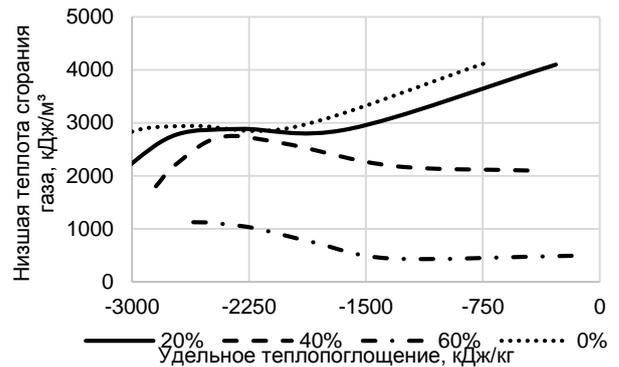


Рис. 7. Зависимость теплоты сгорания пиролизного газа от удельного теплотеплопоглощения при различных значениях влажности ТКО в процессе окислительного пиролиза

Анализ зависимостей на рис. 6, 7 показывает, что величина теплоты сгорания газообразных продуктов окислительного пиролиза в целом ниже, чем «сухого» пиролиза, т.е. в результате окислительного пиролиза образуется большее количество менее калорийного газа.

При влажности ТКО 0% и 20% кривые имеют сходный характер, теплота сгорания возрастает с увеличением температуры. Максимальное значение теплоты сгорания газа 4141 кДж/м^3 имеет место при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$, соответствующей максимальному выходу водорода и монооксида углерода в результате окисления углерода водяным паром и протекания реакции Будуара.

При влажности 40% имеет место пиковое значение теплоты сгорания 2734 кДж/м^3 , соответствующее температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$, далее происходит уменьшение численных значений $Q_{\text{pн}}$, вызванное снижением доли CO и возрастанием доли H_2O в газообразных продуктах.

При влажности 60% с увеличением температуры наблюдается снижение теплоты сгорания, вызванное постоянным снижением доли метана и значительным увеличением доли H_2O . Наибольшее значение теплоты сгорания имеет место при температуре $150 \text{ }^\circ\text{C}$, когда выход метана максимальный при данной влажности.

Результаты моделирования окислительного пиролиза показали, что наиболее калорийный газ с теплотой сгорания 4141 кДж/м^3 и удельным выходом $4,04 \text{ м}^3/\text{кг}$ образуется при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности сырья 0% , а самый «бедный» газ с удельным выходом $4,53 \text{ м}^3/\text{кг}$, имеющий $Q_{\text{pн}} = 490 \text{ кДж/м}^3$, соответствует температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности сырья 60% . Наибольший удельный выход газа $4,69 \text{ м}^3/\text{кг}$ соответствует влажности 40% и температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

Повышение влажности ТКО с 0 до 20% практически не вызывает изменения величины теплоты сгорания газа. Дальнейший рост влажности до 40% приводит к снижению теплоты сгорания приблизительно в 2 раза, а, когда влажность ТКО достигает 60% , теплота сгорания

газообразных продуктов уменьшается на порядок. Таким образом, как и в случае «сухого» пиролиза, окислительный пиролиз целесообразно проводить при влажности ТКО более 40 %.

Выводы. Разработанная имитационная Aspen-модель «сухого» и окислительного пиролиза твердых коммунальных отходов усредненного морфологического состава позволяет выявить влияние удельного теплопоглощения сырья в процессе пиролиза и исходной влажности ТКО на режимные параметры процесса: состав, удельный выход, теплоту сгорания и температуру пиролизного газа.

Результаты моделирования показали целесообразность проведения пиролиза ТКО исследуемого состава при исходной влажности выше 40 %.

Список литературы

1. Михайлова Н.В., Ясинская А.В. Современные технологии энергетической утилизации ТКО // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 8. – С. 4–11.
2. Власов О.А. Технологии переработки твердых бытовых отходов: учеб. пособие. – Красноярск: СФУ, 2019. – 244 с.
3. 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. DOI: 10.31857/S0040364421030078.
4. Киселев М.В., Шантарин В.Д. Пиролиз углеродсодержащих отходов с получением топливных горючих газов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2008. – № 3(69). – С. 117–119.
5. Обзор развития и применения технологии пиролиза для переработки отходов / О.А. Мишустин, В.Ф. Желтобрюхов, Н.В. Грачева, С.Б. Хантимирова // Молодой ученый. – 2018. – № 45(231). – С. 42–45.
6. Колибаба О.Б., Габитов Р.Н. Термическая переработка твердых коммунальных отходов методом пиролиза. – Иваново, 2022. – 136 с.
7. Попов С.К., Свистунов И.Н., Ипполитов В.А. Моделирование высокотемпературных процессов и установок в среде Aspen Plus: учеб. пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2017. – 56 с.
8. Торрефикация – ресурсосберегающее направление термохимической переработки биомассы / А.А. Валинеева, В.А. Масловский, С.К. Попов, И.Н. Свистунов // Вестник МЭИ. – 2021. – № 4. – С. 22–36. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-4-22-36.
9. Simulation of biomass and municipal solid waste pellet gasification using Aspen Plus / A.D.D. Diallo, M.F.R. Alkhatib, M.Z. Alam, M. Mel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1192, No. 1. – P. 012023.
10. Begum S.A., Rasul M.G., Akbar D. Numerical investigation of municipal solid waste gasification using aspen plus // Procedia engineering. – 2014. – P. 710–717.
11. 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.

12. Basu P. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory // Academic Press, 30 Corporate drive. – Burlington, USA, 2010. – 365 p.

References

1. Mikhaylova, N.V., Yasinskaya, A.V. Sovremennye tekhnologii energeticheskoy utilizatsii TKO [Modern technologies for the energy utilization of MSW]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2020, vol. 24, no. 8, pp. 4–11.
2. Vlasov, O.A. *Tekhnologii pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov* [Technologies for processing municipal solid waste]. Krasnoyarsk: SFU, 2019. 244 p.
3. Khaskhachikh, V.V., Larina, O.M., Sychev, G.A., Gerasimov, G.Ya., Zaychenko, V.M. Pirolyticheskie metody termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Pyrolytic methods for thermal processing of municipal solid waste]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 467–480. DOI: 10.31857/S0040364421030078.
4. Kiselev, M.V., Shantarin, V.D. Pirolyz uglerod-soderzhashchikh otkhodov s polucheniem toplivnykh goryuchikh gazov [Pyrolysis of carbon-containing waste to produce fuel combustible gases]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*, 2008, no. 3(69), pp. 117–119.
5. Mishustin, O.A., Zheltobryukhov, V.F., Gracheva, N.V., Khantimirova, S.B. Obzor razvitiya i primeniya tekhnologii piroliza dlya pererabotki otkhodov [Review of the development and application of pyrolysis technology for waste processing]. *Molodoy uchenyy*, 2018, no. 45(231), pp. 42–45.
6. Kolibaba, O.B., Gabitov, R.N. *Termicheskaya pererabotka tverdykh kommunal'nykh otkhodov metodom piroliza* [Thermal processing of solid municipal waste by pyrolysis]. Ivanovo, 2022. 136 p.
7. Popov, S.K., Svistunov, I.N., Ippolitov, V.A. *Modelirovanie vysokotemperaturnykh protsessov i ustanovok v srede Aspen Plus* [Modeling of high-temperature processes and installations in the Aspen Plus environment]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2017. 56 p.
8. Valineeva, A.A., Maslovskiy, V.A., Popov, S.K., Svistunov, I.N. Torrefikatsiya – resursosberegayushchee napravlenie termokhimicheskoy pererabotki biomassy [Torrefaction – a resource-saving direction of thermochemical biomass processing]. *Vestnik MEI*, 2021, no. 4, pp. 22–36. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-4-22-36.
9. Diallo, A.D.D., Alkhatib, M.F.R., Alam, M.Z., Mel, M. Simulation of biomass and municipal solid waste pellet gasification using Aspen Plus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1192, no. 1, pp. 1–8.
10. Begum, S.A., Rasul, M.G., Akbar, D. Numerical investigation of municipal solid waste gasification using aspen plus. *Procedia engineering*, 2014, pp. 710–717.
11. Gabitov, R.N., Kolibaba, O.B., Aksechik, K.V., Artem'eva, V.A. Eksperimental'noe issledovanie oksilitel'nogo 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.
12. Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory. Academic Press, 30 Corporate drive. Burlington, USA, 2010. 365 p.