

УДК 66.092-977-922
AGRIS K50

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/03>

ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

©*Луговой Ю. В.*, ORCID: 0000-0002-0400-8064, SPIN-код: 4270-8180, канд. техн. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, pn-just@yandex.ru

©*Антонов Н. А.*, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, хема96@yandex.ru

©*Чалов К. В.*, ORCID 0000-0002-6611-9667, SPIN-код: 7489-5329, канд. хим. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, tschalov_k@mail.ru

©*Степачева А. А.*, ORCID 0000-0001-9366-5201, SPIN-код: 6628-9111, канд. хим. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, a.a.stepacheva@mail.ru

©*Косивцов Ю. Ю.*, ORCID: 0000-0002-7414-3253, SPIN-код: 4677-5039, д-р хим. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, kosivtsov@science.tver.ru

©*Сулман Э. М.*, ORCID: 0000-0003-0203-3386, SPIN-код: 9877-6072, д-р хим. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, sulman@online.tver.ru

©*Сулман М. Г.*, ORCID: 0000-0001-6543-617X, SPIN-код: 7354-8329, д-р хим. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, sulmanmikhail@ya.ru

THERMAL PROCESSING OF WOOD WASTE

©*Lugovoy Yu.*, ORCID: 0000-0002-0400-8064, SPIN-code: 4270-8180, Ph.D., Tver State Technical University, Tver, Russia, pn-just@yandex.ru

©*Antonov N.*, Tver State Technical University, Tver, Russia, хема96@yandex.ru

©*Chalov K.*, ORCID: 0000-0002-6611-9667, SPIN-code: 7489-5329, Ph.D., Tver State Technical University, Tver, Russia, tschalov_k@mail.ru

©*Stepacheva A.*, ORCID: 0000-0001-9366-5201, SPIN-code: 6628-9111, Ph.D., Tver State Technical University, Tver, Russia, a.a.stepacheva@mail.ru

©*Kosivtsov Yu.*, ORCID: 0000-0002-7414-3253, SPIN-code: 4677-5039, Dr. habil., Tver State Technical University, Tver, Russia, kosivtsov@science.tver.ru

©*Sulman E.*, ORCID: 0000-0003-0203-3386, SPIN-code: 9877-6072, Dr. habil., Tver State Technical University, Tver, Russia, sulman@online.tver.ru

©*Sulman M.*, ORCID: 0000-0001-6543-617X, SPIN-code: 7354-8329, Dr. habil., Tver State Technical University, Tver, Russia, sulmanmikhail@ya.ru

Аннотация. Исследованы процессы термической переработки отходов древесины лиственных и хвойных пород с получением газообразных, жидких и твердых продуктов. В ходе начального этапа работ выполнено термогравиметрическое исследование исходных образцов опилок березы и сосны в температурном интервале от 35 °С до 1000 °С. На основании полученных данных термоанализа разработана методика проведения экспериментов по исследованию процесса пиролиза отходов древесины в интервале температур 400–500 °С в инертной среде. В результате проведения экспериментов по пиролизу древесных отходов получены зависимости конверсии выбранных образцов в конечные продукты, свойств получаемых газообразных и твердых углеродсодержащих продуктов в зависимости от условий протекания процесса, размера фракции и вида древесины. В ходе работы было установлено, что оптимальной температурой процесса пиролиза в исследуемой области значений параметров системы является 450 °С, а размер частиц древесных отходов составляет 1–2 мм. Получены данные по молекулярно–массовому распределению летучих продуктов пиролиза и кинетические параметры процесса пиролиза.

Энергии активации процесса пиролиза для образцов древесных опилок сосны и березы составили 119,3 и 128,2 соответственно. Площадь удельной поверхности исходных образцов древесных отходов березы и сосны составляла 9,3 м²/г и 8,5 м²/г соответственно. Удельная площадь поверхности угольных остатков пиролиза для лиственных пород увеличилась в 2,4 раза а для хвойных в 2,1 раза соответственно и принимала значения 22,3 м²/г и 17,9 м²/г. Следовательно, угольные остатки пиролиза отходов древесины потенциально могут быть использованы в качестве сырья для получения активированных углей и углеродных сорбентов различного применения.

Abstract. Describes the processes of thermal conversion of soft- and hardwood waste to obtain gaseous, liquid and solid products. During the initial stage of the work, the thermogravimetric study of initial samples of birch and pine sawdust was performed in the temperature range from 35 to 1000 °C. On the basis of the thermal analysis data obtained, a method of pyrolysis process of wood waste in the temperature range of 400–500 °C in an inert environment was developed. As a result of experiments on pyrolysis of wood waste, the dependence of the conversion of selected samples into final products, the properties of the resulting gaseous and solid carbon-containing products depending on the conditions of the process, the size of the fraction and the type of wood were obtained. It was found that the optimal temperature of the pyrolysis process in the studied range of system parameters is 450 °C, and the particle size of wood waste is 1–2 mm. Data on the molecular mass distribution of volatile pyrolysis products and kinetic parameters of the pyrolysis process were obtained. The activation energies of the pyrolysis process for pine and birch sawdust samples were 119.3 and 128.2, respectively. The specific surface area of the initial samples of birch and pine wood waste was 9.3 and 8.5 m²/g, respectively. The specific surface area of coal pyrolysis residues for hardwoods increased by 2.4 times and for conifers by 2.1 times, respectively, and assumed values of 22.3 and 17.9 m²/g. Therefore, the coal residues of pyrolysis of wood waste can potentially be used as raw materials for the production of activated carbons and carbon sorbents of various applications.

Ключевые слова: отходы древесины, термогравиметрия, пиролиз, продукты.

Keywords: wood waste, thermogravimetric research, pyrolysis, products.

Введение

Проблема переработки сырья растительного происхождения с целью получения энергии с каждым годом становится все более актуальной вследствие конкурентной борьбы за традиционные энергоносители.

По оценкам экспертов ежегодный прирост биомассы составляет порядка 170 млрд тонн, что дает возможность включения ее в производство энергоресурсов и использования в качестве альтернативы ископаемым ресурсам [1, с. 174]. Использование растительной биомассы обеспечит сохранение баланса CO₂ в атмосфере, а также снизит негативное воздействие на окружающую среду за счет сокращения объемов неиспользуемых отходов.

На сегодняшний день в России очень мало практических примеров проведения успешных проектов по повышению эффективности при производстве энергии из возобновляемого сырья (биомассы). В то же время, в нашей стране имеется немалое количество древесных отходов, которые потенциально пригодны в качестве сырья для производства углей, которые можно активировать с помощью парогазового или химического метода. Так по данным распоряжения Правительства РФ от 25 января 2018 г. №84-р, на лесопромышленных комплексах и деревоперерабатывающих комбинатах ежегодно образуется свыше 200 млн кубометров отходов различных видов древесины [2, с. 8].

Таким образом, разработка процессов конверсии лигноцеллюлозной биомассы в топливо и химические соединения с высокой добавочной стоимостью является важной научно-технической задачей. Однако в настоящее время по-прежнему существуют технологические барьеры не позволяющие осуществить разработку эффективного промышленного метода утилизации данных видов отходов [3, с. 84].

Сложный химический состав лигноцеллюлозной биомассы затрудняет получение целевого топлива и химикатов с высоким выходом и качеством. Структура целлюлозы является самой простой и самой упорядоченной среди основных компонентов химического состава древесины, поскольку целлюлоза состоит только из безводных единиц глюкозы, в то время как гемицеллюлозы содержат множество различных моносахаров. Следовательно, целлюлоза является кристаллической, а гемицеллюлоза имеет случайную аморфную структуру. Лигнин, отличный от углеводной целлюлозы и гемицеллюлозы, представляет собой класс сложных, сшитых трехмерных биополимеров с фенилпропановыми единицами с относительными гидрофобными и ароматическими свойствами. С одной стороны, например, разложение лигнина и гемицеллюлозы обычно проще, чем разложение целлюлозы [4, с. 2938; 5, с. 32].

Все эти различия в химическом составе и структуре в лигнине, гемицеллюлозе и целлюлозе приводят к их значительной различной реакционной способности. Другими словами, разложение и деградация целлюлозы является наиболее сложной и энергоемкой стадией конверсии лигноцеллюлозной биомассы. С другой стороны, исходя из их различной реакционной способности, можно отделить целлюлозу и гемицеллюлозу от лигнина [6, с. 112; 7, с. 1855]. Поэтому многие исследователи, кроме использования естественной лигноцеллюлозной биомассы в качестве реагентов, часто выбирают чистую целлюлозу, в частности микрокристаллическую целлюлозу, в качестве модели лигноцеллюлозной биомассы. На протяжении десятилетий многие исследователи пытались исследовать производство топлив и химических веществ из целлюлозы, которая представляет собой лигноцеллюлозную биомассу [8, с. 3359; 9, с. 83].

В настоящее время эффективными методами переработки твердых лигнинсодержащих отходов с получением ценных для промышленности продуктов являются термические методы переработки [10, с. 5588]. Как показывает опыт, накопленный в области термической переработки отходов биомассы, наиболее эффективным и легко промышленно осуществимым методом является метод пиролиза [11, с. 4172], который позволяет получать газообразные, жидкие и твердые углеродсодержащие продукты [12, с. 293].

Метод пиролиза позволяет легко интегрироваться в процесс термической переработки древесных отходов. Метод не требует использования органических растворителей, водорода, высокого давления в системе и проч. Оборудование метода отличается компактностью и легко оптимизируется под тип перерабатываемого сырья, что позволяет управлять выходом жидких органосодержащих фракций и их свойствами в достаточно широком интервале. Так газообразные и жидкие продукты пиролиза потенциально могут быть использованы как энергоносители для выработки тепловой и электрической энергии или сырья для химических производств, а образующийся углеродсодержащий остаток — в качестве сорбентов и углеродных наполнителей [12, с. 294].

Поэтому подробное изучение процесса пиролиза древесных отходов с использованием реальных образцов растительной биомассы является важной задачей современности, успешное решение которой, возможно, позволит преодолеть зависимость от традиционных источников топлив и снизить экологический вред от их использования.

Материал и методы исследования

В настоящей работе в качестве образцов древесных отходов использовались древесные опилки сосны и березы с влажностью 3,20% и 3,18%, и зольностью 0,36% и 0,17% соответственно. В данном исследовании были использованы опилки со средним размером частиц 0,25–1 мм; 1–2 мм; 2–3 мм.

На первом этапе работы было проведено термогравиметрическое исследование образцов древесных отходов с использованием термовесов Iris TG 209 F1 (NETZSCH). Анализ проводился в среде аргона в интервале температур 35–1000 °С с использованием масс-спектроскопической приставки Aëolos QMS 403D NETZSCH, с температурой капилляра для отбора летучих продуктов термодеструкции — 300 °С.

Исследование термокинетики процессов термодеструкции образцов древесных отходов было проведено в температурном интервале 175–600 °С при различных скоростях нагрева сырья 10 °С/мин, 25 °С/мин, 50 °С/мин в среде аргона с использованием программного обеспечения NETZSCH Termokinetics 3.1.

Экспериментальное исследование процесса пиролиза древесных отходов проводилось в течение 50 мин в среде азота с использованием лабораторной установки периодического действия (Рисунок 1).

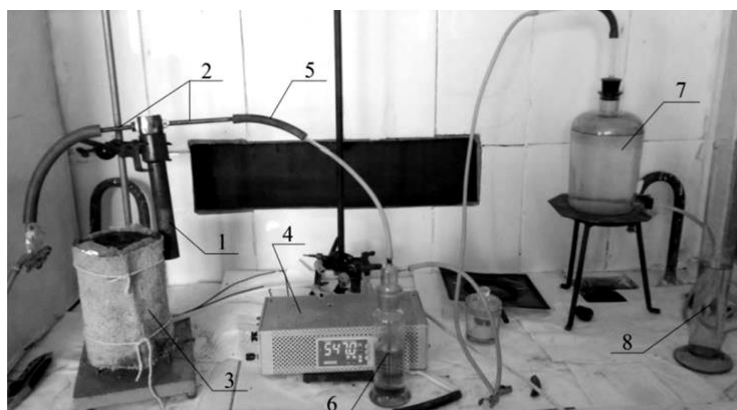


Рисунок 1. Лабораторная установка для проведения процесса пиролиза: 1 — реактор; 2 — фланцы; 3 — печь; 4 — терморегулятор с термопарой; 5 — пробоотборник; 6 — гидрозатвор; 7 — эвдиометр; 8 — стеклянный цилиндр.

Процесс пиролиза древесных отходов проводился в интервале температур от 400 °С до 500 °С. Выбор температурного интервала был основан на предварительно полученных данных термогравиметрического анализа. Масса вносимых в реактор опилок древесины составляла 3 г. В ходе эксперимента производилось постоянное измерение объема образующего газа, а также отбирались пробы газообразных продуктов для дальнейшего хроматографического анализа. Массы твердого остатка и жидкой фракции вычислялись по разности масс реактора и гидрозатвора соответственно.

Состав и теплота сгорания газообразных продуктов пиролиза определялись посредством газоаналитического комплекса на основе газовых хроматографов «Кристаллюкс–4000М» и «Газохром 2000».

Исследование пористости углеродсодержащих остатков пиролиза, полученных из отходов древесины было осуществлено методом низкотемпературной адсорбцией азота с помощью анализатора площади поверхности и распределения пор по размерам: Wesman Coultertm SA 3100T.

Результаты и обсуждение

Результаты термогравиметрического исследования опилок березы и сосны представлены на Рисунке 2. Согласно представленным данным термогравиметрические кривые образцов опилок сосны и березы (Рисунок 2а) имеют некоторые различия в температурном интервале от 200 °С до 400 °С. Следует отметить, что массы углесодержащих остатков, получаемых в ходе термодеструкции исходных образцов в инертной среде, принимают близкие значения. Это может объясняться достаточно сходными свойствами термически разрушаемых материалов.

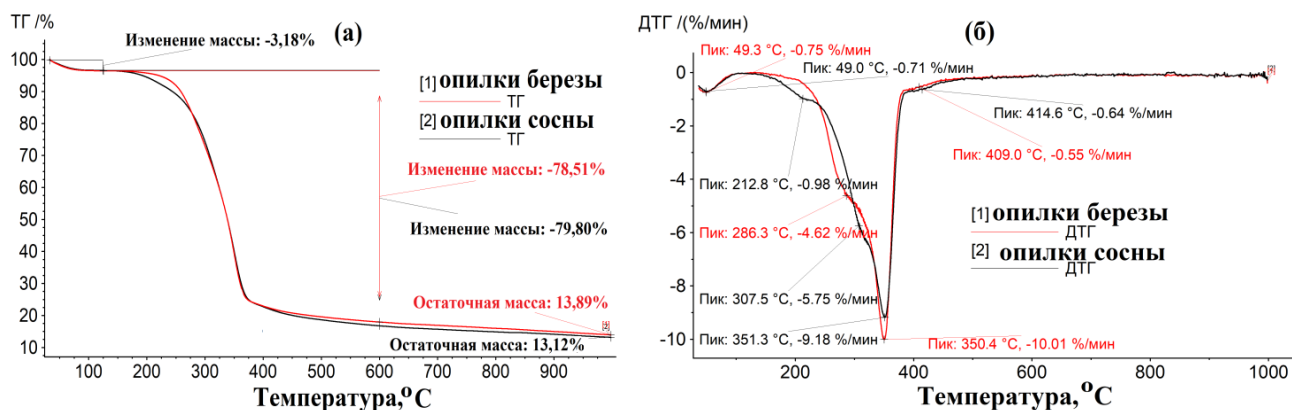


Рисунок 2. Термогравиметрические (а) и дифференциально–термогравиметрические кривые (б) березовых и сосновых опилок в интервале температур 35–1000 °С.

Тем не менее, у исследуемых образцов древесных отходов имеются существенные отличия в протекании процессов термодеструкции в указанном ранее температурном диапазоне, которые становятся более различимыми при построении дифференциальных термогравиметрических кривых (Рисунок 1б). Данные отличия, по мнению авторов, связаны с разным компонентным составом древесины хвойных и лиственных пород, а именно с различным содержанием полиоз, гемицеллюлоз (пентозанов), целлюлозы и лигнина [1, с. 188]. Опубликованные известные данные о компонентном составе сосновой и березовой древесины представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

ЛИТЕРАТУРНЫЕ ДАННЫЕ ПО КОМПОНЕНТНОМУ СОСТАВУ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ И БЕРЕЗЫ

Состав	Сосна обыкновенная	Береза бородавчатая	
Холоцеллюлоза	74,3	—	—
Целлюлоза	52,2	56,5–57,6	45,3 35,4
Полиозы	13,5	8,4	— 11,7
Пентозаны	8,2	10,5	25,3 22,1
Лигнин	26,3	27	23,9 19,7
Растворимые:			
в спирто–бензоле	—	3,3	2,6 0,9
в горячей воде	—	3,4	— 1,4
Зола	—	0,37	0,4 0,14
	[14, с. 461–468]	[15, с. 142]	[16, с. 12] [13, с. 190]

Согласно данным термогравиметрического анализа интенсивное протекание процессов термодеструкции древесных отходов происходит в интервале 250–450 °С, что соответствует

процессам деструкции основных компонентов биомассы — экстрактивным веществам, полиозам, гемицеллюлозам, лигнину и целлюлозе.

Экспериментальные данные, отражающие зависимость конверсии выбранных для исследования древесных отходов от температуры пиролиза изучалась на лабораторной установке. Причем для обоих исследуемых видов древесных отходов массовая доля газообразных продуктов пиролиза возрастает, а массовая доля углеродсодержащих остатков убывает с повышением температуры процесса. Следует отметить, что для исследуемых образцов также отличны зависимости выхода жидких продуктов пиролиза от температуры пиролиза. В случае березовых опилок значения массовой доли жидких продуктов достигают максимума при температуре 450 °С, а при пиролизе сосновых опилок количество жидких продуктов растет во всем исследуемом температурном диапазоне.

Согласно представленным на Рисунке 3 зависимостям, можно сделать вывод, что образцы березовых опилок в данном температурном интервале приводили к большему выходу газообразных продуктов и меньшей выходу твердых углеродсодержащих остатков по сравнению с образцами сосновых опилок.

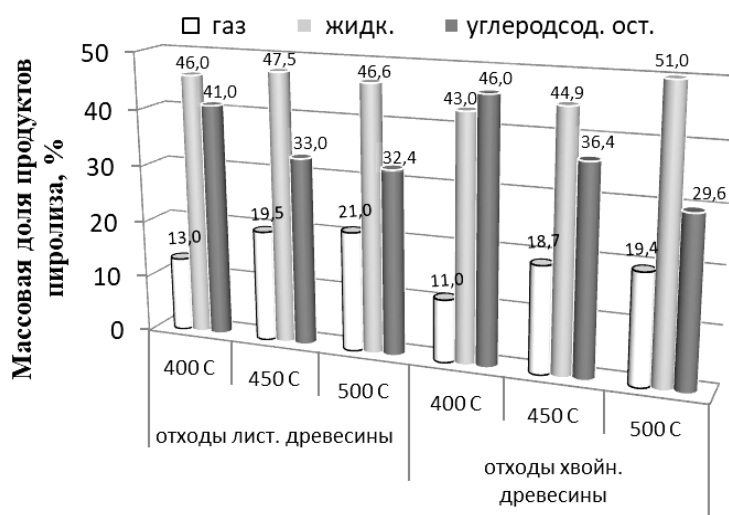


Рисунок 3. Зависимость конверсии отходов хвойной и лиственной древесины от температуры пиролиза.

При оптимизации процессов пиролиза часто используют количество и качество получаемых газообразных продуктов, поскольку это позволяет снизить энергетические затраты на проведение процесса пиролиза за счет сжигания образующегося газа. Исследуя представленные на Рисунке 3 зависимости, можно сказать, что оптимальной температурой позволяющей получать высокие выходы газообразных продуктов является 450 °С. Поэтому дальнейшие исследования процесса пиролиза древесных отходов проводились при этой температуре.

На Рисунке 4, представлена зависимость конверсии выбранных видов древесных отходов от размера частиц сырья. Как видно из данных, представленных на Рисунке 4, распределение продуктов пиролиза для сосновых и березовых опилок отличается незначительно. Следует отметить, что зависимости массового распределения продуктов пиролиза от размера фракции частиц отходов древесины связано с разницей в составе и физико-химических свойствах данных типов древесных отходов.

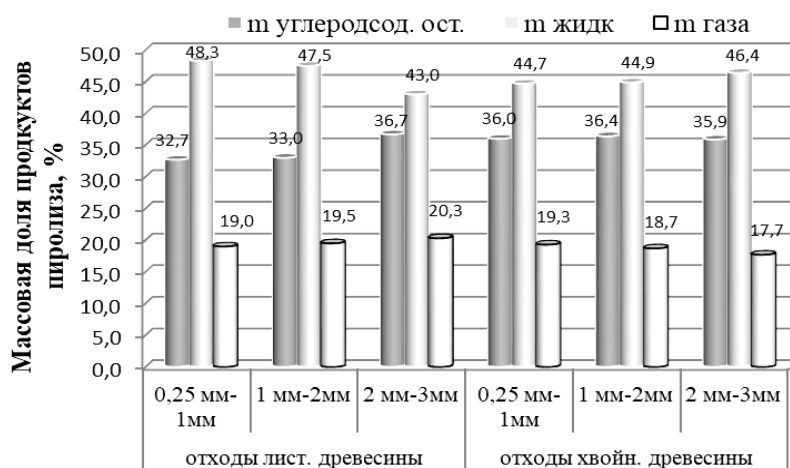


Рисунок 4. Зависимость выхода продуктов пиролиза от типа древесных отходов и размера частиц сырья ($t = 450^\circ\text{C}$).

Следует также отметить, что при уменьшении размера частиц отходов древесины происходит снижение скорости образования пиролизного газа, что возможно связано с изменением теплопроводности слоя биомассы. Максимальная скорость образования пиролизных газов для всех исследуемых в работе случаев находилась в интервале 10–12 мин от начала проведения эксперимента, что соответствует температуре внутри реактора от 345°C до 372°C . Тем не менее, для частиц древесины меньшего размера суммарный объем газа, образующегося при пиролизе, был наибольшим, что, вероятно, связано с преобладанием макрокинетических факторов над макрокинетическими факторами теплообмена. Важной характеристикой процесса является теплота сгорания пиролизного газа, которая при организации замкнутого цикла также будет влиять на себестоимость переработки древесных отходов в ценные для химической промышленности продукты. Зависимость теплоты сгорания газообразных продуктов пиролиза от вида древесины представлена на Рисунке 5.

Однако с учетом экономических факторов наиболее оптимальной является фракция древесных отходов с размером частиц 1–2 мм, что позволяет получать высокие выходы газообразных и твердых продуктов при относительно низких затратах на измельчение исходных отходов.

Согласно данным, представленным на Рисунке 5, теплота сгорания газообразных продуктов пиролиза древесины лиственных пород несколько выше, чем у хвойных, что связано с более высокими концентрациями этана и более низкими концентрациями водорода, имеющего низкую объемную теплоту сгорания (Рисунок 6).

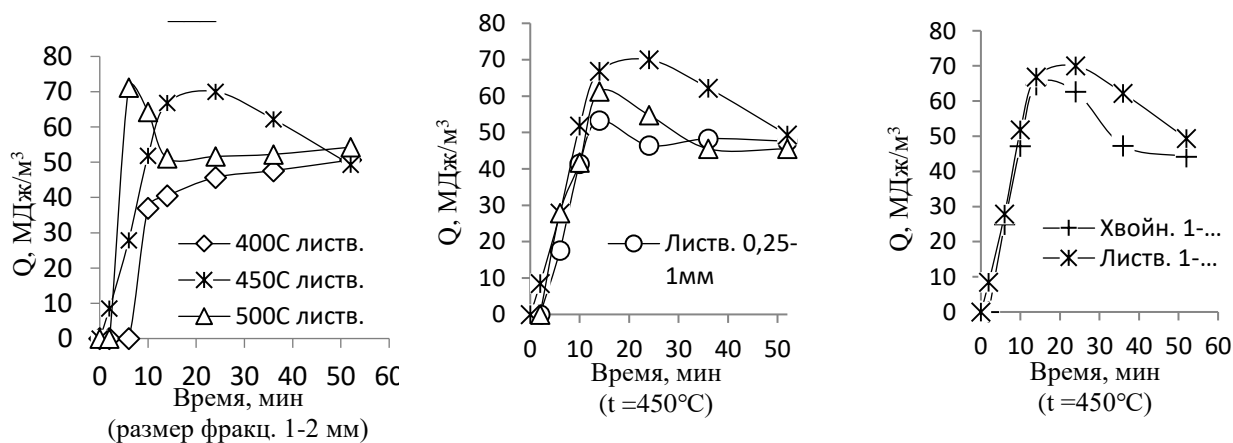


Рисунок 5. Зависимости теплоты сгорания газообразных продуктов от температуры, размера частиц и вида отходов древесины.

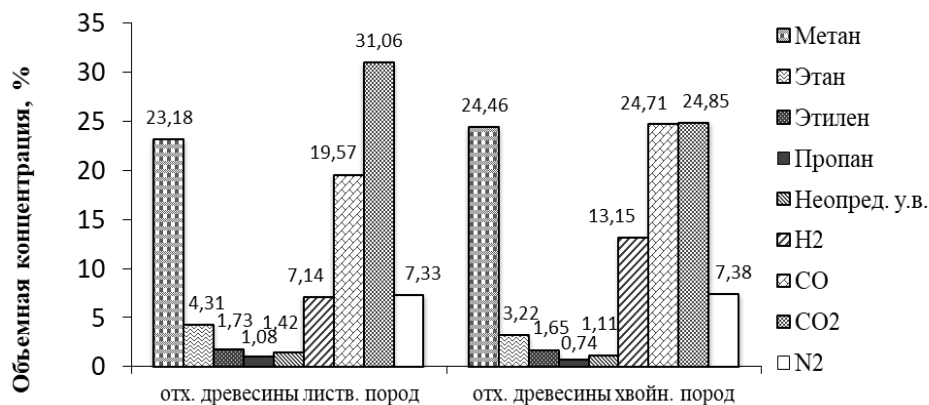


Рисунок 6. Состав пиролизного газа в зависимости от вида древесных отходов (размер частиц фракции 1–2 мм, 24 мин. эксп., $t = 430\text{ }^{\circ}\text{C}$).

В работе также было исследовано молекулярно-массовое распределение летучих продуктов пиролиза древесных отходов с помощью масс-спектрометрического детектора (Рисунок 7). Согласно представленным данным по молекулярно-массовому распределению, летучие продукты пиролиза древесных отходов весьма схожи и достигают значений молекулярного веса — 80–90 а.е.м.

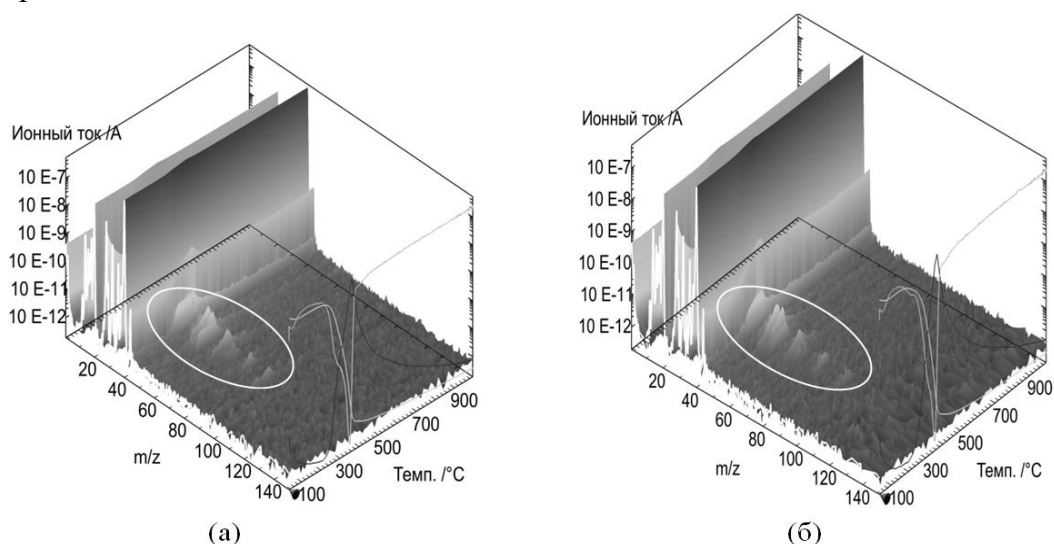


Рисунок 7. Молекулярно–массовое распределение летучих продуктов пиролиза березовых (а) и сосновых (б) древесных отходов, полученное по данным ТГ–масс-спектроскопического анализа.

Таким образом, в состав газообразных фракций могут входить достаточно высокомолекулярные, возможно, смолистые вещества, которые способны обеспечить достаточно высокие значения низшей объемной теплоты сгорания газообразных продуктов (Рисунок 5). Также в рамках исследования были выполнены расчет кинетических параметров процесса пиролиза образцов опилок березы и сосны с размером частиц 1–2 мм (Таблица 2).

Анализ представленных в Таблице 2 данных позволяет судить о том, что энергия активации пиролиза березовых опилок больше чем опилок сосны по различным оценкам на величину от 8,9 кДж/моль до 15,1 кДж/моль. Это подтверждает меньшую термическую устойчивость сосновой древесины в исследуемом интервале температур процесса. Поскольку теплота сгорания газообразных продуктов принимала наибольшие значения для размера частиц фракции отходов древесины 1–2 мм, как для лиственных (береза), так и для хвойных

(сосна) пород, поэтому для исследования пористости были выбраны углеродсодержащие остатки пиролиза отходов древесины данных фракций.

Таблица 2.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ОТХОДОВ ДРЕВЕСИНЫ,
 РАССЧИТАННЫЕ ПО ДАННЫМ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Тип древесины	Модель независимые методы		Методы линейной кинетики
	ASTM E698	ASTM E1641	
<i>Береза</i>			
Еа, кДж/моль	141,1±7,3	123,6±9,0	128,2
Аехр	9,90×10 ⁻¹	9,03×10 ⁻¹	9,3×10 ⁻¹
n-реакции	—	—	2,53
R (коэфф. корр.)	—	—	0,9978
<i>Сосна</i>			
Еа, кДж/моль	126,0±5,7	76,3±17,4	119,3
Аехр	9,89×10 ⁻¹	4,37×10 ⁻¹	8,4×10 ⁻¹
n-реакции	—	—	2,31
R (коэфф. корр.)	—	—	0,9975

Площадь удельной поверхности исходных образцов древесных отходов березы и сосны составляла 9,3 м²/г и 8,5 м²/г соответственно. Удельная площадь поверхности угольных остатков пиролиза для лиственных пород увеличилась в 2,4 раза а для хвойных в 2,1 раза соответственно и принимала значения 22,3 м²/г и 17,9 м²/г.

Величины площадей удельной поверхности данных образцов уже на этом этапе соответствуют характеристикам дешевых углеродных сорбентов применяемых в промышленности. Таким образом, угольные остатки пиролиза отходов древесины потенциально могут быть использованы в качестве сырья для получения активированных углей различного применения.

Выводы

1. Термогравиметрическое исследование отходов древесины показало различие в протекании процессов деструкции сосновых и березовых образцов, что вероятнее всего связано с различным составом и строением данных образцов.

2. Теплота сгорания газообразных продуктов пиролиза древесины лиственных пород в 1,1–1,2 раза выше, чем у хвойных, что связано с более высокими концентрациями этана и более низкими концентрациями водорода, имеющего низкую объемную теплоту сгорания.

3. Оптимальной температурой для проведения процесса пиролиза выбранных образцов древесных отходов является 450 °С при размере фракции 1–2 мм.

4. Образцы березовой древесины обладали большей термической устойчивостью по сравнению с образцами древесины сосны, что подтверждает более высокие значения энергии активации.

5. Угольные остатки пиролиза отходов древесины по значениям величины площади удельной поверхности соответствуют характеристикам дешевых углеродных сорбентов применяемых в промышленности, что говорит о возможности их практического применения.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант 19-79-10061).

Список литературы:

1. Передерий С. Перспективы использования биотоплива из древесного сырья // Леспроминформ. 2013. №8. С. 170.
2. Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 г. №84-р. <https://clck.ru/KrJHF>
3. Serrano-Ruiz J. C., Dumesic J. A. Catalytic routes for the conversion of biomass into liquid hydrocarbon transportation fuels // *Energy & Environmental Science*. 2011. V. 4. №1. P. 83-99. <https://doi.org/10.1039/C0EE00436G>
4. Sun Y., Lu X., Zhang S., Zhang R., Wang X. Kinetic study for Fe (NO₃)₃ catalyzed hemicellulose hydrolysis of different corn stover silages // *Bioresource technology*. 2011. V. 102. №3. P. 2936-2942. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.076>
5. Pandey M. P., Kim C. S. Lignin depolymerization and conversion: a review of thermochemical methods // *Chemical Engineering & Technology*. 2011. V. 34. №1. P. 29-41. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000270>
6. Piqueras C. M., Cabeza A., Gallina G., Cantero D. A., García-Serna J., Cocero M. J. Online integrated fractionation-hydrolysis of lignocellulosic biomass using sub-and supercritical water // *Chemical Engineering Journal*. 2017. V. 308. P. 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.007>
7. Collinson S. R., Thielemans W. The catalytic oxidation of biomass to new materials focusing on starch, cellulose and lignin // *Coordination chemistry reviews*. 2010. V. 254. №15-16. P. 1854-1870. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2010.04.007>
8. Klemm D., Heublein B., Fink H. P., Bohn A. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material // *Angewandte chemie international edition*. 2005. V. 44. №22. P. 3358-3393. <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>
9. Van de Vyver S., Geboers J., Jacobs P. A., Sels B. F. Recent advances in the catalytic conversion of cellulose // *ChemCatChem*. 2011. V. 3. №1. P. 82-94. <https://doi.org/10.1002/cctc.201000302>
10. Zhou C. H., Xia X., Lin C. X., Tong D. S., Beltramini J. Catalytic conversion of lignocellulosic biomass to fine chemicals and fuels // *Chemical Society Reviews*. 2011. V. 40. №11. P. 5588-5617. <https://doi.org/10.1039/C1CS15124J>
11. Butler E., Devlin G., Meier D., McDonnell K. A review of recent laboratory research and commercial developments in fast pyrolysis and upgrading // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. V. 15. №8. P. 4171-4186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.035>
12. Zhang J., Choi Y. S., Yoo C. G., Kim T. H., Brown R. C., Shanks B. H. Cellulose-hemicellulose and cellulose-lignin interactions during fast pyrolysis // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2015. V. 3. №2. P. 293-301. <https://doi.org/10.1021/sc500664h>
13. Азаров В. И., Буров А. В., Оболенская А. В. Химия древесины и синтетических полимеров. СПб.: СПбЛТА, 1999. 628 с.
14. Kollmann F., Fengel D. Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung // *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1965. V. 23. №12. P. 461. <https://doi.org/10.1007/BF02627217>
15. Роговин З. А., Шорыгина Н. Н. Химия целлюлозы и ее спутников. М., 1953, 142 с.
16. Wagenführ R., Scheiber C. *Holz atlas*. Leipzig: Fachbuchverlag, 1974. P. 690.

References:

1. Perederii, S. (2013). Perspektivy ispol'zovaniya biotopliva iz drevesnogo syr'ya. *Lesprominform*, (8), 170. (in Russian).
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 25 yanvary 2018 g. No. 84-r. <https://clck.ru/KrJHF>
3. Serrano-Ruiz, J. C., & Dumesic, J. A. (2011). Catalytic routes for the conversion of biomass into liquid hydrocarbon transportation fuels. *Energy & Environmental Science*, 4(1), 83-99. <https://doi.org/10.1039/C0EE00436G>

4. Sun, Y., Lu, X., Zhang, S., Zhang, R., & Wang, X. (2011). Kinetic study for Fe (NO₃)₃ catalyzed hemicellulose hydrolysis of different corn stover silages. *Bioresource technology*, 102(3), 2936-2942. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.076>
5. Pandey, M. P., & Kim, C. S. (2011). Lignin depolymerization and conversion: a review of thermochemical methods. *Chemical Engineering & Technology*, 34(1), 29-41. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000270>
6. Piqueras, C. M., Cabeza, A., Gallina, G., Cantero, D. A., García-Serna, J., & Cocero, M. J. (2017). Online integrated fractionation-hydrolysis of lignocellulosic biomass using sub- and supercritical water. *Chemical Engineering Journal*, 308, 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.007>
7. Collinson, S. R., & Thielemans, W. (2010). The catalytic oxidation of biomass to new materials focusing on starch, cellulose and lignin. *Coordination chemistry reviews*, 254(15-16), 1854-1870. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2010.04.007>
8. Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P., & Bohn, A. (2005). Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte chemie international edition*, 44(22), 3358-3393. <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>
9. Van de Vyver, S., Geboers, J., Jacobs, P. A., & Sels, B. F. (2011). Recent advances in the catalytic conversion of cellulose. *ChemCatChem*, 3(1), 82-94. <https://doi.org/10.1002/cctc.201000302>
10. Zhou, C. H., Xia, X., Lin, C. X., Tong, D. S., & Beltramini, J. (2011). Catalytic conversion of lignocellulosic biomass to fine chemicals and fuels. *Chemical Society Reviews*, 40(11), 5588-5617. <https://doi.org/10.1039/C1CS15124J>
11. Butler, E., Devlin, G., Meier, D., & McDonnell, K. (2011). A review of recent laboratory research and commercial developments in fast pyrolysis and upgrading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4171-4186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.035>
12. Zhang, J., Choi, Y. S., Yoo, C. G., Kim, T. H., Brown, R. C., & Shanks, B. H. (2015). Cellulose-hemicellulose and cellulose-lignin interactions during fast pyrolysis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(2), 293-301. <https://doi.org/10.1021/sc500664h>
13. Azarov, V. I., Burov, A. V., & Obolenskaya, A. V. (1999). Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov. St. Petersburg. (in Russian).
14. Kollmann, F., & Fengel, D. (1965). Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 23(12), 461. <https://doi.org/10.1007/BF02627217>
15. Rogovin, Z. A., & Shorygina, N. N. (1953). Khimiya tsellyulozy i ee sputnikov, Moscow. (in Russian).
16. Wagenführ, R., & Scheiber, C. (1974). Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag.

Работа поступила
в редакцию 20.11.2019 г.

Принята к публикации
25.11.2019 г.

Ссылка для цитирования:

Луговой Ю. В., Антонов Н. А., Чалов К. В., Степачева А. А., Косивцов Ю. Ю., Сульман Э. М., Сульман М. Г. Термическая переработка древесных отходов // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №12. С. 26-36. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/03>

Cite as (APA):

Lugovoy, Yu., Antonov, N., Chalov, K., Stepacheva, A., Kosivtsov, Yu., Sulman, E., & Sulman, M. (2019). Thermal Processing of Wood Waste. *Bulletin of Science and Practice*, 5(12), 26-36. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/03> (in Russian).