

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-48-56>
УДК 662.71Оригинальная статья**В. П. Голубев¹, Н. Е. Шевчик¹, Д. В. Дегтерев¹, А. Н. Асадчий¹, С. В. Василевич^{2*}**¹*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь*²*Белорусская государственная академия авиации,
ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь***ПОЛУЧЕНИЕ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ ПУТЕМ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСИНЫ
В ПРИСУТСТВИИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Аннотация. Разработано экспериментальное оборудование для получения древесного угля из остатков лесопиления методом термохимической конверсии биомассы в бескислородной среде. Особенностью данного оборудования является проведение процесса термоконверсии древесного сырья в камере пиролиза, оснащенной источниками сверхвысокочастотного электромагнитного поля (СВЧ). Пиролизное оборудование включает в себя блок получения генераторного газа из органических отходов, блок пиролиза древесины, систему продувки камеры пиролиза инертным газом, камеру дожига газовой смеси генераторного газа и пирогаза, блок регулирования температуры продуктов горения, теплообменник, дымосос, систему управления и контроля за работой пиролизной установки и дымовую трубу. В качестве источников СВЧ использовали магнетроны. Приведено описание методики проведенных испытаний оборудования по получению древесного угля в присутствии и в отсутствие СВЧ. В ходе испытаний использовалась древесина твердолиственных пород (колотые дрова клена). Результаты исследования указывают на то, что использование СВЧ позволяет повысить скорость процесса термохимической деструкции древесины, увеличить производительность оборудования для выработки древесного угля, а также получить больший выход древесного угля на единицу массы исходной древесины, сырье или продукт с большей теплотворной способностью и меньшей зольностью. Так, производительность экспериментальной пиролизной установки при отсутствии СВЧ составила 1,42 кг/ч, а в присутствии СВЧ – 1,73 кг/ч, увеличение составило 22 %. Разработанная технология получения древесного угля термическим пиролизом в присутствии СВЧ является экономически и энергетически перспективной.

Ключевые слова: термохимическая конверсия, древесный уголь, пиролизное оборудование, дожиг, сверхвысокочастотное электромагнитное поле

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Голубев Виктор Петрович – кандидат биологических наук, заведующий сектором Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0009-0007-4062-3455>, e-mail: vpgolubev@mail.ru; Шевчик Николай Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0009-0007-5270-2302>, e-mail: neshevchik@gmail.com; Дегтерев Дмитрий Валентинович – старший научный сотрудник Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0009-0006-0209-2852>, e-mail: ddegterov@mail.ru; Асадчий Андрей Николаевич – старший научный сотрудник Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0009-0000-7758-0435>, e-mail: asadchyi@tut.by; Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Белорусской государственной академии авиации, <https://orcid.org/0000-0002-9250-2926>, e-mail: svasilevich@yandex.ru

Вклад авторов: Голубев Виктор Петрович – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, проведение эксперимента, интерпретация результатов исследования; Шевчик Николай Евгеньевич – обоснование концепции, проведение инструментальных исследований, формулировка выводов; Дегтерев Дмитрий Валентинович – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, проведение эксперимента, интерпретация результатов исследования; Асадчий Андрей Николаевич – проведение эксперимента, интерпретация результатов исследования; Василевич Сергей Владимирович – систематизация результатов, написание текста рукописи.

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Для цитирования: Получение древесного угля путем пиролиза древесины в присутствии сверхвысокочастотного электромагнитного поля / В. П. Голубев, Н. Е. Шевчик, Д. В. Дегтеров [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 1. – С. 48–56. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-48-56>

Поступила в редакцию: 10.02.2025

Доработанный вариант: 20.06.2025

Утверждена к публикации: 05.03.2026

Подписана в печать: 12.03.2026

Original article

Viktor P. Golubev¹, Nikolai E. Shevchik¹, Dmitry V. Degterov¹, Andrei N. Asadchyi¹, Siarhei V. Vasilevich^{2*}

¹*Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
15, building 2, Akademicheskaya St., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian State Aviation Academy,
77, Uborevich St., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

PRODUCTION OF CHARCOAL BY PYROLYSIS OF WOOD IN THE PRESENCE OF AN ULTRAHIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD

Abstract. Experimental equipment for producing charcoal from sawmill residues using thermochemical conversion of biomass in an oxygen-free environment has been developed. This equipment features thermal conversion of wood raw materials in a pyrolysis chamber equipped with microwave sources. The pyrolysis equipment includes a unit for producing generator gas from organic waste, a wood pyrolysis unit, a pyrolysis chamber purging system with inert gas, an afterburner for the generator gas and pyrolysis gas mixture, a combustion product temperature control unit, a heat exchanger, a smoke exhaust, a pyrolysis unit control and monitoring system, and a chimney. Magnetrons were used as microwave sources. A description of the testing methodology for the equipment for producing charcoal in the presence and absence of a microwave field is provided. Hardwood (split maple firewood) was used in the tests. The results of the study indicate that the use of microwave technology can increase the rate of thermochemical destruction of wood, increase the productivity of equipment for the production of charcoal, and also obtain a higher yield of charcoal per unit mass of the original wood, raw material or product with a higher calorific value and lower ash content. For example, the productivity of the experimental pyrolysis unit without microwaves was 1.42 kg/h, while with microwaves, it was 1.73 kg/h, an increase of 22 %. The developed technology for producing charcoal by thermal pyrolysis in the presence of microwaves offers economic and energy-efficient potential.

Keywords: thermochemical conversion, charcoal, pyrolysis equipment, afterburning, microwave electromagnetic field

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: Viktor P. Golubev – Cand. Sci. (Biology), Head of the Sector at Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0007-4062-3455>, e-mail: vpgolubev@mail.ru; Nikolai E. Shevchik – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher at Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0007-5270-2302>, e-mail: neshevchik@gmail.com; Dmitry V. Degterov – Senior Researcher at Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0006-0209-2852>, e-mail: ddegterov@mail.ru; Andrei N. Asadchyi – Senior Researcher at Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0000-7758-0435>, e-mail: asadchyi@tut.by; Siarhei V. Vasilevich – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leader Researcher at Belarusian State Aviation Academy, <https://orcid.org/0000-0002-9250-2926>, e-mail: svasilevich@yandex.ru

Contribution of the authors: Viktor P. Golubev – concept justification, development of experimental study design, experiment implementation, interpretation of study results; Nikolai E. Shevchik – concept justification, instrumental studies, formulation of conclusions; Dmitry V. Degterov – concept justification, development of experimental study design, experiment implementation, interpretation of study results; Andrei N. Asadchyi – experiment implementation, interpretation of study results; Siarhei V. Vasilevich – systematization of results, writing the manuscript.

For citation: Golubev V. P., Shevchik N. E., Degterov D. V., Asadchyi A. N., Vasilevich S. V. Production of charcoal by pyrolysis of wood in the presence of an ultrahigh frequency electromagnetic field. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 1, pp. 48–56 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-48-56>

Received: 10.02.2025

Modified: 20.06.2025

Approved for publication: 05.03.2026

Signed to the press: 12.03.2026

Введение. В настоящее время исследования энергетически возобновляемых ресурсов ряда стран, в том числе Беларуси и России, направлены на увеличение выработки электрической и тепловой энергии за счет использования новых видов твердого топлива и вовлечения в оборот различных видов возобновляемых ресурсов [1; 2].

Одним из эффективных процессов термохимической переработки органических соединений является пиролиз [3]. Он представляет собой процесс термохимической переработки органических соединений, который происходит при повышенных температурах без участия кислорода.

Теоретические и прикладные исследования пиролиза биомассы успешно развиваются на протяжении последних десятилетий в Великобритании [4], США [5], Индии [6] и других странах мира [7], а также представляют значительный интерес для Беларуси.

Интенсивное развитие биоэнергетики в Беларуси обусловлено необходимостью достижения определенного уровня энергетической безопасности и создания в итоге топливно-энергетического цикла на возобновляемых видах биотоплива с учетом экологических и экономических преимуществ данного направления.

Одним из основных возобновляемых природных ресурсов являются леса, которые покрывают около 38 % территории страны, что превосходит среднеевропейский уровень – 32 %. При среднем приросте древесной биомассы около 25 млн м³ в год (более 6,25 млн т у. т.) оценки потенциальных резервов биотоплива в Беларуси колеблются от 6 до 10 млн т у. т. в год [8]. Эти оценки учитывают нестроевую древесину, отходы лесозаготовок, деревообработки, фитомассу быстрорастущих кустарников и трав.

Существуют различные способы использования биомассы в качестве источника энергии: традиционное сжигание при получении электрической и тепловой энергии (дрова, щепа, пеллеты, твердые бытовые отходы растительного происхождения); анаэробное сбраживание сельскохозяйственных растений (кукуруза и др.), отходов сельскохозяйственного производства, а также отходов животноводства и птицеводства; получение моторного топлива (биодизель) из семян сельскохозяйственных растений (рапс). Указанные технологии давно отработаны и получили широкое распространение.

Переработка сухой биомассы (влажностью до 15 %) возможна с использованием термохимических технологий (газификация, пиролиз). Такие процессы обладают высокими скоростями конверсии, низкой чувствительностью к составу исходного сырья, но требуют высоких температур и характеризуются низкой селективностью [9].

Среди современных технологий энергетического использования растительной биомассы наиболее универсальной, эффективной и дешевой, по мнению экспертов Международного энергетического агентства (International Energy Agency), является термохимическая конверсия методом пиролиза [10]. В результате пиролиза образуется горючий газ, высокоэнергетические жидкие продукты и древесный уголь. Количество продуктов термохимических преобразований зависит прежде всего от температуры и времени процесса, скорости нагрева и параметров газовой среды. Кроме того, на состав и свойства продуктов пиролиза влияют порода и качество древесины, размеры частиц сырья и его начальная влажность, скорость циркуляции газового потока через слои древесины и другие факторы [11].

На сегодня наиболее востребованным целевым продуктом пиролиза древесины является древесный уголь – твердый пористый продукт пиролиза растительной биомассы, который образуется наряду с жидкими продуктами (смолами) и горючими газами. Он находит применение в качестве высококачественного возобновляемого твердого топлива (теплота сгорания 30–35 МДж/кг), а также в промышленности, например при получении технического кремния [12]. В настоящее время расширяется использование древесного угля в производстве углеродных сорбентов, которые применяются в различных технологиях адсорбционной очистки и разделения [13; 14].

Побочным продуктом при получении древесного угля являются газы, содержащие органические примеси (от низкомолекулярных до полициклических ароматических смол). Смолы создают значительные проблемы в системах пиролиза биомассы [15], в частности они конденсируются в выходных газотоках (образуются отложения и коррозия), на фильтрах, приводя к их засорению. В настоящее время разработано множество технологий снижения содержания смол в продуктах пиролиза биомассы. Конструкционно их можно разделить на первичные, когда смолы удаляются непосредственно в пиролизном реакторе [16], и вторичные, использующие вынесенный участок очистки пиролизного газа [17].

По своей сути методы снижения содержания смол в пиролизных газах можно разделить на термохимические (каталитический и термический крекинг) и физические (адсорбция и абсорбция) [18]. Наиболее простыми с технической и экономической точек зрения являются физические

ские способы очистки пиролизных газов. Более того, аппараты, в которых использован данный способ очистки, технически просты и легко масштабируются. К таким устройствам относят фильтры, гранулированные слои, вращающиеся сепараторы, электростатические фильтры, скрубберы. Применение физических методов позволяет улавливать от 50 до 74 % первоначальных смол.

Более эффективными с точки зрения доли удаления смол являются термохимические методы (например, прямое термическое разложение, которое требует проведения процесса при температуре порядка 1200 °C).

Цель исследования – разработка экспериментального оборудования для получения древесного угля, использующего процесс термоконверсии древесного сырья в камере пиролиза, которая оснащена источниками создания электромагнитного поля сверхвысокой частоты с целью достижения достаточных температур для удаления получаемых смол.

Описание оборудования по получению древесного угля. На основе результатов исследования термохимической конверсии древесины на базе Института энергетики Национальной академии наук Беларуси была разработана и изготовлена пиролизная установка по получению древесного угля (рис. 1).

Данная установка позволяет реализовывать процесс термоконверсии древесины при включенных режимах генерации СВЧ. Она включает в себя блок получения генераторного газа из органических отходов, блок пиролиза древесины, систему продувки камеры пиролиза инертным газом, камеру дожига смеси генераторного газа и пирогаза, блок регулирования температуры продуктов горения, теплообменник, дымосос, систему управления и контроля за работой пиролизной установки (на схеме не показана) и дымовую трубу.

Блок получения генераторного газа из органических отходов, или газогенератор для сжигания сыпучего топлива, например древесной щепы, представляет собой топку (1) с установленным сверху бункером (2) подачи биомассы. При горении биомассы в топке в условиях ограниченной подачи кислорода образуется генераторный газ, который смешивается с образующимся в реакторе (3) пиролизным газом, после чего сгорает в камере дожига (8). Газогенератор оборудован специальным устройством, которое обеспечивает равномерное распределение щепы в топке и подачу новой партии щепы после выгорания предыдущей. Имеется устройство, которое позволяет регулировать объем воздуха, поступающего в топку, для получения оптимального количества генераторного газа в соответствии с условиями работы установки.

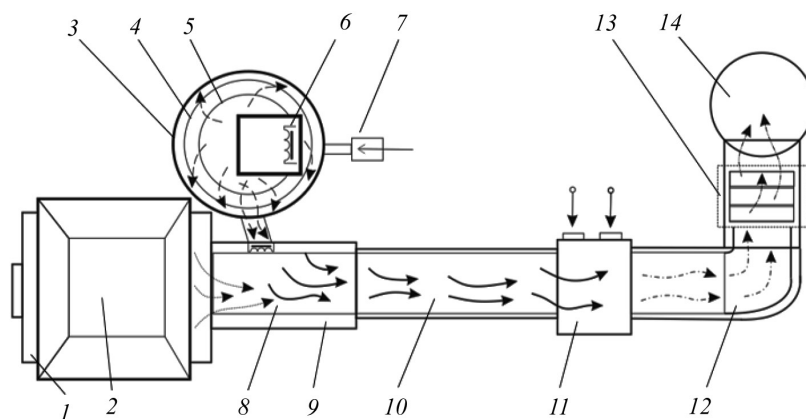


Рис. 1. Схема пиролизной установки для получения древесного угля: 1 – топка газогенератора; 2 – бункер загрузки биомассы; 3 – реактор; 4 – загрузочная платформа с вращающимся дном; 5 – реторта; 6 – СВЧ-излучатель; 7 – устройство продувки камеры пиролиза инертным газом; 8 – камера дожига (смесительная часть); 9 – теплоизоляционный экран; 10 – подающий коллектор (основная часть); 11 – блок воздушного охлаждения с фильтрацией охлаждающего воздуха; 12 – подающий коллектор (хвостовая часть); 13 – теплообменный узел с байпасной линией сорбционной очистки дымовых газов; 14 – дымовая труба с дымососом

Fig. 1. The scheme of the pyrolysis plant for the production of charcoal: 1 – gasifier furnace; 2 – biomass loading bin; 3 – reactor; 4 – loading platform with rotating bottom; 5 – retort; 6 – microwave emitter; 7 – device for purging the pyrolysis chamber with inert gas; 8 – afterburner chamber (mixing part); 9 – heat-insulating screen; 10 – feed manifold (main part); 11 – air cooling unit with cooling air filtration; 12 – feed manifold (tail part); 13 – heat exchange unit with a bypass line for sorption purification of flue gases; 14 – chimney with a smoke exhauster

Блок пиролиза древесины – это пиролизный реактор (3), включающий в себя камеру реактора, оборудованную трубчатыми электронагревателями (ТЭНами), устройствами создания электромагнитного поля СВЧ (6), загрузочную платформу с вращающимся дном (4) и реторту (5).

В систему продувки камеры пиролиза инертным газом (7) входят баллон с инертным газом (CO_2), регулятор расхода газа, газовый коллектор и вентиль. Продувка позволяет быстро удалить горючие остатки пиролизного газа из камеры реактора, что обеспечивает возможность произвести загрузку новой партии пиролизуемого материала, не дожидаясь полного охлаждения камеры реактора. Сокращение времени на разогрев камеры пиролизного реактора ускоряет пиролиз следующих образцов на 30–45 мин.

Камера дожига газовой смеси (8) включает в себя устройство смешивания генераторного газа и пирогаза для обеспечения равномерного горения смеси газов, термопары для определения температуры горения генераторного газа, термопары для определения температуры горения смеси генераторного газа и пирогаза, смотровую трубу. Конструкция камеры дожига представляет собой металлический короб, выполненный из жаропрочной и кислотостойкой нержавеющей стали с двойными стенками. Температура горения в камере дожига может достигать 1300 °C, это способствует эффективной очистке газовой смеси от высокомолекулярных соединений (смола). Камера дожига и подающий коллектор (10, 12) имеют общий теплоизоляционный экран (9) толщиной 100 мм.

Блок воздушного охлаждения с фильтрацией охлаждающего воздуха (11) обеспечивает поступление в теплообменник продуктов сгорания газовой смеси оптимальной температуры. Этот блок состоит из следующих элементов: камера охлаждения, сервопривод регулирующей заслонки, термопара, рукав подачи охлаждающего воздуха, блок фильтрующих элементов. Подача воздуха в блок воздушного охлаждения производится вентилятором радиальным ВР 80-75 низкого давления одностороннего всасывания с частотой вращения 1500 об/мин и мощностью двигателя 0,25 кВт.

Воздушный рекуперативный теплообменник (13) изготовлен из нержавеющей стали. На выходе из теплообменника установлены дымосос и дымовая труба (14).

Система управления и контроля работы пиролизной установки включает в себя термопары, манометры и органы управления (питание всех элементов установки, подъем/опускание загрузочной платформы, включение/отключение вентиляторов системы подачи охлаждающего воздуха, дымососа, ТЭНов блока пиролиза (реактора), устройств создания электромагнитного поля СВЧ), расположенные на щите шкафа управления.

Выброс дымовых газов в атмосферу, проходящих через рекуперативный теплообменник системы нагрева технологической воды системы отопления, производится дымососом через дымовую трубу.

Управление и контроль за работой пиролизной установки осуществляется с рабочего места оператора, которое в целях безопасности находится в отдельном помещении. Органы управления расположены на щите шкафа управления. Визуализация основных рабочих параметров установки реализована посредством специально разработанной программы для ПК, обеспечивающей снятие основных характеристик процесса (температурные значения в основных точках, показатели давления, скорости газового потока, мощностных характеристик) в реальном времени и дублируют работу контрольно-измерительных приборов.

В качестве контрольно-измерительных приборов нами использовались термопары КТХА, тип К (диапазон температур от –40 до 1200 °C) для измерения температуры, дифференциальный манометр для измерения давления, датчик потока для измерения скорости потока, регулятор напряжения для управления ТЭНами реактора.

В зависимости от пиролизуемого сырья в контроллере шкафа управления устанавливается заданная рабочая программа (всего разработано 10), согласно которой осуществляется управление и контроль основных параметров техпроцесса:

- скорости нагрева и длительности работы ТЭНов реактора с контролем температуры в различных точках газового тракта установки;
- мощности и длительности работы СВЧ-излучателей;
- температуры (воздушной заслонкой с сервоприводом) на выходе из камеры дожига и магнетронов, системы охлаждения;
- температуры на выходе из теплообменника, на входе в дымосос.

Работа пиролизной установки. В ходе испытаний установки использовалась древесина твердолиственных пород (колотые дрова клена). Перед началом испытаний определялась влажность древесины и производилось контрольное взвешивание пустой и загруженной реторты. Влажность древесины составила 12,2 %, плотность древесины – 590,2 кг/м³, зольность – 0,23 %.

Масса древесины и угля определялась с помощью весов напольных МИ МДА 518-Т (класс III, погрешность ± 10 –20 г). Относительная погрешность измерения массы древесины составила 0,07 %, при взвешивании угля – 0,13 %.

После взвешивания реторта устанавливалась на загрузочную платформу блока пиролиза. Конструкция платформы имеет приводной механизм, обеспечивающий вращение реторты вокруг вертикальной оси. Затем производился подъем платформы с установленной ретортой в рабочую камеру реактора.

Управление подъемом реторты в камеру блока пиролиза осуществляется автоматически с помощью системы управления и контроля работы пиролизной установки. На начальной стадии механизм подъема работает на максимальной скорости для сокращения времени подготовки пиролизной установки к работе. На конечной стадии подъема этот механизм работает на минимальной скорости, чтобы обеспечить максимально герметичное прижатие платформы. Переключение с максимальной на минимальную скорость загрузки, а также остановка механизма подъема производятся автоматически. После загрузки сырья производится включение ТЭНов блока пиролиза, устройств создания электромагнитного поля СВЧ в блоке пиролиза и камеры дожига газовой смеси, вентилятора блока регулирования температуры продуктов горения, дымососа. Также производится поджиг топлива в топке газогенератора. На протяжении всего цикла пиролиза осуществляется визуальный контроль параметров работы на ПК и с помощью смотровой трубы, расположенной в камере дожига газовой смеси.

Начало стадии эндотермического пиролиза древесины в блоке пиролиза характеризуется поглощением тепла, снижением роста температуры в рабочей камере блока пиролиза, отсутствием выраженного горения в камере дожига. Дымовые газы имеют белый цвет. В начале стадии экзотермического процесса происходит выделение тепла – наблюдается рост температуры в рабочей камере блока пиролиза, выделение большого количества горючих пиролизных газов. Наблюдается интенсивное горение в камере дожига, появление дымовых газов серого цвета из дымовой трубы. Завершение процесса пиролиза сопровождается отсутствием выраженного горения в камере дожига и отсутствием дымовых газов, выходящих из дымовой трубы. После окончания процесса пиролиза производится прокалка (температура и длительность определяется оператором с помощью системы управления и контроля работы пиролизной установки). После прокалики происходит отключение ТЭНов и магнетронов блока пиролиза и включение подачи инертного газа (СО₂) для вытеснения горючих газов из рабочей камеры блока пиролиза (длительность продувки – 15 мин) и дальнейшего остывания готового древесного угля и его стабилизации. При этом отключаются вентиляторы дымососа и системы охлаждения камеры дожига блока регулирования температуры продуктов горения. После полного остывания реторта с полученным древесным углем извлекается из камеры реактора и взвешивается.

Большое внимание в ходе проведенных работ было уделено сравнительному анализу процессов пиролиза древесины в отсутствие и в присутствии СВЧ.

В данной серии экспериментов в качестве генераторного газа использовали смесь пропан-бутан. Температура горения данной смеси постоянна, что позволяет создать устойчивые реперные точки для определения вклада пирогаза в суммарную температуру горения пропан-бутановой смеси и пирогаза. Использование температуры горения пропана в качестве реперной точки позволяет достаточно точно выявлять даже небольшие температурные изменения при горении смеси генераторного газа и пирогаза.

Также необходимо учитывать, что в начальной стадии пиролиза выход горючих газообразных продуктов еще слишком мал, чтобы поддерживать самостоятельное горение, в завершающей стадии пиролиза выход горючих газообразных продуктов уже слишком мал, чтобы поддерживать самостоятельное горение. Поэтому постоянный факел огня пропана позволяет сжечь малые количества пирогаза и обеспечить надлежащий уровень экологической безопасности.

При сравнительном анализе в экспериментах в присутствии СВЧ проводили задержку в течение 10 мин включения магнетронов и ТЭНов. Такая задержка на начальной стадии эксперимента

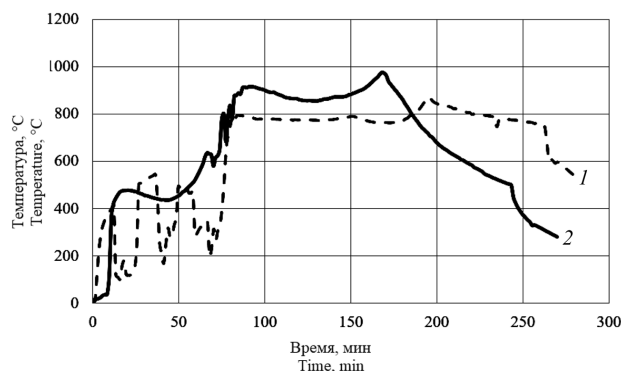


Рис. 2. Зависимость температуры нагрева рабочей среды от времени в камере дожига в отсутствие (1) и в присутствии (2) сверхвысокочастотного электромагнитного поля

Fig. 2. Dependence of the heating temperature of the working medium on time in the afterburning chamber in the absence (1) and in the presence (2) of a microwave electromagnetic field

позволяет избежать «наложения» графиков температур и более детально провести сравнительный анализ пиролиза древесины для получения древесного угля в отсутствие и в присутствии СВЧ.

Из экспериментальных данных (рис. 2) видно, что на начальной стадии пиролиза без СВЧ наблюдается энергичный рост температуры до 420 °C, затем происходит резкое снижение до 102 °C с выходом на небольшое плато. В данном случае логично предположить, что происходит досушивание древесины с образованием значительного количества водяного пара, который и снижает температуру. После досушивания образца происходит резкий рост температуры до уровней более 500 °C (интервал 25–50 мин). Имеет место начало термохимической деструкции веществ со слабыми химическими связями и высвобо-

ждение газообразных продуктов (например, уксусной кислоты). Затем снова наблюдается спад уровня температур, так как в результате химических превращений происходит образование веществ, поддерживающих и не поддерживающих горение (легкие углеводороды, вода, оксиды углерода, азота и т. п.). С началом экзотермической стадии пиролиза температура поднимается до 800 °C (196 мин). По завершении экзотермической стадии пиролиза начинается прокалка, которая характеризуется постепенным плавным снижением температуры.

В присутствии СВЧ-поля начальный этап пиролиза характеризуется отсутствием резких перепадов подъема-падения температур, так как сверхвысокочастотное электромагнитное поле способствует одновременному прохождению всех процессов эндотермической стадии пиролиза, что и выравнивает график температур. При этом в процессе работы пиролизной установки в экзотермической стадии температура горения в камере дожига достигала 1000 °C, что обуславливает эффективный дожиг газовой смеси. Время экзотермической стадии с СВЧ меньше, чем аналогичной стадии без СВЧ. Стадия закалки также сопровождается более быстрым снижением температуры.

Эти данные однозначно свидетельствуют о более высокой скорости пиролиза древесины и более высокой температуре дожига газовой смеси в присутствии СВЧ.

В ходе исследований были получены образцы древесного угля при включенных и выключенных устройствах создания электромагнитного СВЧ-поля (таблица).

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что использование СВЧ позволило повысить производительность пиролизной установки на 22 %, при этом характеристики полученных образцов соответствуют требованиям для древесного угля марки А¹.

Характеристики образцов древесного угля, полученных при включенных и выключенных устройствах создания электромагнитного СВЧ-поля

Characteristics of charcoal samples obtained with the microwave electromagnetic field generating devices turned on and off

Наличие сверхвысокочастотного электромагнитного поля The presence of an ultra-high-frequency electromagnetic field	Масса использованных древесных образцов, кг Weight of used wood samples, kg	Относительный массовый выход древесного угля, % Relative mass yield of charcoal, %	Масса полученного угля, кг Mass of coal obtained, kg	Основные характеристики полученных образцов угля Main characteristics of the obtained coal samples	
				Удельная энергия сгорания, кДж/кг Specific combustion energy, kJ/kg	Зольность, % Ash content, %
В отсутствие СВЧ In the absence of a microwave	31,0	~ 22,9	7,1	30 435,31	1,26
В присутствии СВЧ In the presence of a microwave	31,7	24,6	7,8	32 066,77	1,12

¹ ГОСТ 7657-84. Уголь древесный. Технические условия. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294822/4294822380.htm> (дата обращения: 10.01.2025)

Меньшее значение зольности в угле, полученном с использованием СВЧ, объясняется тем, что хотя абсолютное значение массы золы остается неизменным и не зависит от наличия СВЧ, относительное содержание золы регулируется концентрацией основного компонента в образце – углерода. И так как массовый выход угля при использовании СВЧ выше, чем без него, следовательно, абсолютное значение содержания углерода в образцах угля, полученных с использованием СВЧ, выше, чем в его отсутствие. По этой причине относительное содержание золы (относительно общего содержания компонентов) в угле, полученном с использованием СВЧ, ниже, чем без его использования. Также нельзя исключить, что под действием СВЧ происходит более полная термическая деструкция азотсодержащих органических соединений.

Закключение. Полученные результаты показывают, что использование поля СВЧ позволяет увеличить производительность процесса получения древесного угля и повысить качество получаемого продукта. Расход электрической энергии при работе установки (без СВЧ) составляет от 3,5 до 7 кВт·ч (в зависимости от задач эксперимента), при этом дополнительный расход электрической энергии при использовании СВЧ-излучения – от 2,0 до 2,2 кВт·ч. Однако более высокая производительность установки в присутствии СВЧ и полученный древесный уголь с существенно большей удельной энергией сгорания делают эту технологию энергетически и экономически выгодной. Поэтому разработка оборудования для получения древесного угля в присутствии СВЧ является актуальной задачей.

Также необходимо отметить, что описанное оборудование является экспериментальным, и при создании промышленных установок дополнительные затраты электроэнергии на поддержание СВЧ будут, несомненно, учитываться. При выполнении данной работы главной задачей являлось изучение влияния СВЧ на процесс получения древесного угля, а в дальнейших исследованиях – его физико-химических характеристик.

Список использованных источников

1. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>
2. Фортов, В. Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель // Теплоэнергетика. – 2014. – № 6. – С. 4–13.
3. Лосюк, Ю. А. Некоторые аспекты термохимической конверсии торфа / Ю. А. Лосюк, С. В. Жибрик, С. В. Корчиненко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2008. – № 5. – С. 60–66.
4. Bridgwater, A. V. Biomass Fast Pyrolysis / A. V. Bridgwater // Thermal Science. – 2004. – Vol. 8, № 2. – P. 21–49. <https://doi.org/10.2298/TSCI0402021B>
5. Mohan, D. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-Oil: A Critical Review / D. Mohan, Ch. U. Pittman, P. H. Steele Jr. // Energy & Fuels. – 2006. – Vol. 20. – P. 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
6. Chan, W. R. Modeling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of large biomass particle / W. R. Chan, M. Kelbon, B. B. Krieger // Fuel. – 1985. – Vol. 64. – P. 1505–1513. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(85\)90364-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(85)90364-3)
7. Catalytic supercritical water gasification of biomass waste using iron-doped alkaline earth catalysts / R. Bakari, T. Kivevele, X. Huang, Y. A. C. Jande // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2024. – Vol. 14, iss. 6. – P. 7487–7506. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02800-x>
8. Макрокинетика и тепломассоперенос в процессах термохимической конверсии биомассы / Г. И. Пальченко, Н. Г. Хутская, И. В. Янцевич, Т. М. Мощина // Возобновляемые источники энергии: потенциал, достижения, перспективы: материалы Междунар. семинара экспертов (Минск, 22–24 февр. 2011 г.) / под ред. А. А. Михалевича. – Мн.: Бел. наука, 2011. – С. 206–220.
9. Пиролиз горючих сланцев Туровского месторождения / П. Л. Фалюшин, К. В. Доброго, В. М. Крайко, Е. В. Ануфриева // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, № 3. – С. 583–589.
10. Преобразование энергии биомассы. Опыт России / Е. С. Панцхава, В. А. Пожарнов, Л. В. Зысин [и др.] // Теплоэнергетика. – 1996. – № 5. – С. 33–38.
11. Косивцов, Ю. Ю. Технология пиролиза органических материалов: монография / Ю. Ю. Косивцов, Э. М. Сульман. – Тверь: ТГТУ, 2010. – 124 с.
12. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ: в 2 ч. / С. А. Апостолов, С. Е. Бабаш, А. Д. Беренц [и др.]. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2005. – Ч. 2. – 1144 с.
13. Обзор рынка активированного (активного) угля в СНГ / Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов, металлургии и химической промышленности. – М., 2019. – 193 с.
14. Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic Carbon's ABCs / N. Hagemann, K. Spokas, H.-P. Schmidt [et al.] // Water. – 2018. – Vol. 10, iss. 2. – P. 182. <https://doi.org/10.3390/w10020182>

15. Dayton, D. A. Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report. NREL/TP-510-32815 / D. Dayton. – National Renewable Energy Laboratory, 2002. – URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32815.pdf> (date of access: 10.11.2020).
16. Devi, L. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes / L. Devi, K. J. Ptasinski, F. J. J. G. Janssen // *Biomass and Bioenergy*. – 2003. – Vol. 24, iss. 2. – P. 125–140. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00102-2)
17. Anis, S. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review / S. Anis, Z. A. Zainal // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15, iss. 5. – P. 2355–2377. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.018>
18. Performance of tar removal by absorption and adsorption for biomass gasification / A. Paethanom, S. Nakahara, M. Kobayashi [et al.] // *Fuel Process Technology*. – 2012. – Vol. 104. – P. 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.05.006>

References

1. Korsak, E. P. Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 388–398 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>
2. Fortov V. E., Popel' O. S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 389–398. <https://doi.org/10.1134/S0040601514060020>
3. Losyuk Yu. A., Zhibrik S. V., Korshchenko S. V. Some aspects of thermochemical conversion of peat. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2008, no. 5, pp. 60–66 (in Russian).
4. Bridgwater A. V. Biomass Fast Pyrolysis. *Thermal Science*, 2004, vol. 8, no. 2, pp. 21–49. <https://doi.org/10.2298/TSCI0402021B>
5. Mohan D., Pittman Ch. U., Steele Jr. P. H. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-Oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, 2006, vol. 20, pp. 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
6. Chan W. R., Kelbon M., Krieger B. B Modeling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of large biomass particle. *Fuel*, 1985, vol. 64, pp. 1505–1513. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(85\)90364-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(85)90364-3)
7. Bakari R., Kivevele T., Huang X., Jande Y. A. C. Catalytic supercritical water gasification of biomass waste using iron-doped alkaline earth catalysts. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, vol. 14, iss. 6, pp. 7487–7506. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02800-x>
8. Palchenok G. I., Khutskaia N. G., Yantsevich I. V., Moshchina T. M. Macrokinetics and heat and mass transfer in the processes of thermochemical conversion of biomass. Mikhalevich A. A., ed. *Vozobnovlyayemye istochniki energii: potencial, dostizheniya, perspektivy: materialy Mezhdunarodnogo seminar ekspertov (Minsk, 22–24 fevralya 2011 g.)* [Renewable energy sources: potential, achievements, prospects: Proceedings of the International Expert Seminar (Minsk, 22–24 February 2011)]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011, pp. 206–220 (in Russian).
9. Falyushin P. L., Dobrego K. V., Kraiko V. M., Anufrieva E. V. Pyrolysis of oil shales of the Turov field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2011, vol. 84, no. 3, pp. 631–637. <https://doi.org/10.1007/s10891-011-0515-7>
10. Panskhaeva E. S., Pozharnov V. A., Zysin L. V., Farberov V. G., Shramkov V. M., Mayorov N. I., Shkola I. I. Conversion of biomass energy. Experience of Russia. *Teploenergetika* [Thermal Power Engineering], 1996, no. 5, pp. 33–38 (in Russian).
11. Kosivtsov Yu. Yu., Sulman E. M. *Technology of Pyrolysis of Organic Materials: Monograph*. Tver, Tver State Technical University, 2010. 124 p. (in Russian).
12. Apostolov S. A., Babash S. E., Berents A. D., Borutskii P. N., Vasil'ev Yu. V., Vasil'ev S. N. [et al.]. *New Handbook of Chemist and Technologist. Raw Materials and Products of the Industry of Organic and Inorganic Substances. Part 2*. St. Petersburg, ANO NPO "Professional" Publ., 2005. 1144 p. (in Russian).
13. Association of Independent Experts in the Field of Mineral Resources, Metallurgy and Chemical Industry. *Market Overview of Activated (Active) Carbon in the CIS*. Moscow, 2019. 193 p. (in Russian).
14. Hagemann N., Spokas K., Schmidt H. P., Kägi R., Böhrer M. A., Bucheli T. D. Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic Carbon's ABCs. *Water*, 2018, vol. 10, iss. 2, p. 182. <https://doi.org/10.3390/w10020182>
15. Dayton D. A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report. NREL/TP-510-32815. National Renewable Energy Laboratory, 2002. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32815.pdf> (accessed 10 November 2020).
16. Devi L., Ptasinski K. J., Janssen F. J. J. G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass and Bioenergy*, 2003, vol. 24, iss. 2, pp. 125–140. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00102-2)
17. Anis S., Zainal Z. A. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, iss. 5, pp. 2355–2377. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.018>
18. Paethanom A., Nakahara S., Kobayashi M., Prawisudha P., Yoshikawa K. Performance of tar removal by absorption and adsorption for biomass gasification. *Fuel Process Technology*, 2012, vol. 104, pp. 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.05.006>