

**ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСИНЫ  
ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO<sub>2</sub> НА ПОЛИГОНАХ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ**© 2024 А.В. Власов, И.Д. Ахмедова<sup>2</sup>, Д. О. Перфильев<sup>1</sup>, М. А. Васильев<sup>1</sup><sup>1</sup> ООО «АЙ-ЭКСП», г. Москва, Россия<sup>2</sup> Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия

Статья поступила в редакцию 03.07.2024

Переработка древесных отходов становится все более актуальной проблемой в связи с ростом потребления древесных материалов и увеличением объемов отходов, образующихся в результате лесозаготовок, деревообрабатывающей и мебельной промышленности. Традиционные методы утилизации древесных отходов, такие как сжигание и захоронение, вызывают значительные экологические проблемы, включая выбросы парниковых газов и загрязнение почвы и воды. В этом контексте пиролиз древесины представляет собой перспективный метод переработки, позволяющий не только уменьшить объем отходов, но и получить ценные продукты, такие как биоуголь, биомасло и синтез-газ. В данной статье рассматривается эффективность применения технологии пиролиза древесины как технологии сокращения выбросов от хранения кородревесных отходов (КДО). В работе представлены результаты расчета сокращения удельных выбросов CO<sub>2</sub> при переработке плотных кородревесных отходов в биоуголь, а также потенциальный эффект при переработке КДО объемом 100 тыс. м<sup>3</sup> в год, в том числе накопленный эффект при горизонте планирования в 15 лет.

*Ключевые слова:* древесные отходы; пиролиз; парниковые газы; биоуголь, углеродные единицы.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4-170-176

EDN: FYNLUH

**ВВЕДЕНИЕ**

Сокращение выбросов углекислого газа (CO<sub>2</sub>) является ключевым элементом в борьбе с изменением климата. В Российской Федерации нормативная база, обосновывающая необходимость сокращения выбросов парниковых газов опирается, в том числе на Указ Президента № 666, направленный на сокращение выбросов на 70% по сравнению с уровнем 1990 года к 2030 году [1], и несколько постановлений правительства, регулирующих деятельность юридических лиц и индивидуальных предпринимателей [2].

Наиболее значительными источниками выбросов парниковых газов являются промышленные предприятия и топливно-энергетический комплекс (ТЭК), которые являются основными потребителями топливно-энергетических ресурсов [3]. Повышение энергоэффективности производства продукции и выборки тепловой и энергетической энергии в значительной мере решает задачу сокращения удельных выбросов промышленностью и ТЭК [4], при этом сокращение выбросов от утилизации отходов промышленных предприятий остается актуальной задачей.

*Власов Александр Владимирович, научный сотрудник Института прикладных информационных технологий МЭИ.  
Ирина Ахмедова, кандидат географических наук, доцент Высшей экологической школы, Югорский государственный университет, эколог-аудитор ассоциации экологов-аудиторов «Национальная экологическая аудиторская палата» (АЭА «НЭАП»)  
E- idakhmedova@mail.ru*

*Перфильев Денис Олегович, Генеральный директор.  
Васильев Михаил Анатольевич, научный сотрудник.*

Один из значительных источников выбросов CO<sub>2</sub> – полигоны древесных отходов. Древесные отходы на полигонах разлагаются, выделяя в атмосферу углекислый газ и метан, что усугубляет парниковый эффект. В данной статье рассматривается важность сокращения выбросов CO<sub>2</sub> на полигонах древесных отходов, методы достижения этой цели и их экологические и экономические преимущества.

**Парниковый эффект и изменение климата:** Выбросы CO<sub>2</sub> и метана (CH<sub>4</sub>), возникающие при разложении древесных отходов, существенно влияют на парниковый эффект. Метан, выделяемый при анаэробном разложении органических материалов, в 25 раз более эффективен в удержании тепла в атмосфере по сравнению с CO<sub>2</sub> [5, 6].

**Загрязнение воздуха:** Разложение древесных отходов на полигонах сопровождается выделением летучих органических соединений (ЛОС), которые способствуют образованию приземного озона, вредного для здоровья человека и окружающей среды.

Условия разложения отходов различаются в зависимости от условий места расположения на объектах размещения отходов (ОРО) [5].

Существуют различные методы сокращения выбросов CO<sub>2</sub> на полигонах древесных отходов. Самый распространённый, в данный момент, это аэробное компостирование. Аэробное компостирование древесных отходов предотвращает образование метана, так как процесс происходит в присутствии кислорода, что способствует образованию CO<sub>2</sub>, но в меньших количествах и других менее вредных га-

зов, в отличие от анаэробного разложения, при котором без доступа кислорода образуется метан, являющийся гораздо более сильным парниковым газом [7, 8].

Сжигание древесных отходов также является эффективным методом сокращения негативного воздействия полигонов на окружающую среду по сравнению с традиционным захоронением [9], при этом негативное воздействие на окружающую среду хоть и сокращается, но также остается значительным [10]. При этом, как правило, полигоны хранения древесных отходов удалены от населенных пунктов или каких-либо промышленных потребителей тепловой и электрической энергии, в результате чего типичными для российской промышленности являются примеры сжигания древесных отходов без какой-либо полезной генерации тепловой или электрической энергии.

Третьим методом является пиролиз древесины. Пиролиз древесины представляет собой термическое разложение органического материала в отсутствие кислорода. Этот процесс включает в себя несколько стадий:

Нагрев и удаление влаги: при нагреве древесины до температуры 100-200°C происходит испарение воды, содержащейся в древесине.

Разложение гемицеллюлозы и целлюлозы: при температуре 200-300°C начинается термическое разложение гемицеллюлозы и целлюлозы с образованием летучих веществ и твердого остатка (биоугля).

Разложение лигнина: при дальнейшем повышении температуры (300-500°C) происходит разложение лигнина, что сопровождается выделением значительного количества летучих веществ [11].

Различают несколько видов пиролиза в зависимости от температурного режима и времени выдержки:

Медленный пиролиз: проводится при температуре 300-400°C в течение нескольких часов. Основным продуктом – биоуголь.

Быстрый пиролиз: проводится при температуре 450-600°C в течение нескольких секунд или минут. Основным продуктом – биомасло.

Флеш-пиролиз: проводится при температуре 500-1000°C в течение нескольких миллисекунд. Основным продуктом – синтез-газ [12].

Из анализа источников литературы можно сделать вывод, что кинетика процесса пиролиза является достаточно изученной как в общем [11, 12], так и в применении для конкретных пород деревьев [13]. При этом продуктовая корзина может быть изменена в зависимости от температуры пиролиза [14].

Биоуголь (biochar) – твердый углеродсодержащий материал, получаемый в результате пиролиза древесины. Он обладает высокими адсорбционными свойствами и может использоваться в сельском хозяйстве в качестве улучшителя почвы, а также в качестве

активированного угля для очистки воды и воздуха [15].

Биомасло (bio-oil) – жидкий продукт пиролиза, представляющий собой сложную смесь органических соединений. Оно может использоваться в качестве топлива или сырья для химической промышленности. Технологии доработки биомасла позволяют получать из него более ценные химические продукты и топливо [15].

Синтез-газ (syngas) – газовая смесь, состоящая преимущественно из водорода, окиси углерода и метана. Он может использоваться как топливо для производства электроэнергии или как сырье для синтеза химических продуктов, таких как метанол или аммиак [15].

Пиролиз древесины имеет ряд экологических преимуществ по сравнению с традиционными методами утилизации отходов. Он позволяет значительно уменьшить объем отходов, снизить выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ, а также получить ценные продукты, которые могут заменить ископаемые ресурсы. Кроме того, использование биоугля в сельском хозяйстве способствует улучшению качества почвы и снижению эрозии. Так в работе Asterios Parageorgiou и др. [16] рассмотрены варианты восстановления почвы с помощью биоугля.

Przemyslaw Maziarka и другие в своей работе [17] рассмотрели потенциал применения биоугля в качестве материала для электродов в суперконденсаторах.

Проведенный анализ литературных источников показал, что процессы кинетики производства биоугля, а также его применения широко описаны в научной литературе, при этом практически нет сведений о потенциальном снижении выбросов парниковых газов при утилизации древесных отходов путем переработки с помощью пиролиза в сравнении с традиционным захоронением.

Новизна текущего исследования заключается в анализе потенциала применения технологии пиролиза древесины для сокращения выбросов CO<sub>2</sub> на полигонах древесных отходов. Данная статья рассмотрит эффект от внедрения установки пиролиза объемом переработки 50 тыс. тонн в год на типовом полигоне древесных отходов, образовавшихся в результате хозяйственной деятельности ЦБК.

## МЕТОДОЛОГИЯ

При применении технологии пиролиза древесины, методология расчета потенциала сокращения выбросов парниковых газов от разложения хранящейся на полигонах древесных отходов древесины, основана на методике, утвержденной в 371 приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации [5].

Важной составляющей, влияющей на точность расчёта, является корректный выбор

климатической зоны. В данной работе выбрана арктическая и умеренная климатическая зона с среднегодовой температурой меньше 20 °С.

Выбросы от топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), расходуемых на технологический процесс переработки КДО в биоуголь, не учитываются, т.к. предполагается, что установка пиролиза будет получать электроэнергию и прочие топливно-энергетические ресурсы из экологически чистых источников. Такое предположение основано на реальном опыте, когда ЦБК получают энергию от сжигания в энергетических котлах кородревесных отходов, которые согласно методическим указаниям являются биотопливом и выбросы от их сжигания не учитываются [5].

Не учитывается затухание реакции разложения углерода, т.к. полигон постоянно пополняется новыми отходами, которые в свою очередь являются сырьем для установки пиролиза.

Потенциал глобального потепления для  $\text{CH}_4$  принят равным 25 тонн  $\text{CO}_2$  на 1 тонну  $\text{CH}_4$  [5].

Поправочный коэффициент для метана (MCF), в связи с отсутствием фактических данных, выбран 0,6 (для объектов вне категории). Для пересчета объема в массу, плотность КДО принята 0,5 г/см<sup>3</sup>

Модель затухания первого порядка (ЗПП) основывается на экспоненциальной функции, описывающей ту часть разложимого органического вещества, захороненного в течение ряда лет отходов, которая каждый год распадается на  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ . Часть образованного при этом метана окисляется в верхних слоях объектах размещения отходов (ОРО), либо может быть рекуперирована с целью получения энергии или сжигания в факельной установке. Таким образом, количество метана, выброшенного в атмосферу непосредственно со ОРО, будет значительно меньше количества образовавшегося  $\text{CH}_4$ . Выбросы  $\text{CH}_4$ , образующиеся от мест захоронения твердых отходов, оцениваются с помощью уравнения 1 [5]:

$$\text{Выбросы } \text{CH}_4 = \sum_{i,j} [(\text{CH}_4 \text{ образованный}_{i,j} - R_j) \cdot (1 - \text{OX}_j)], \quad (1)$$

где выбросы  $\text{CH}_4 = \text{CH}_4$ , выброшенный в атмосферу от ОРО, Гг;

$\text{CH}_4 \text{ образованный}_{i,j} = \text{CH}_4$ , образованный на определенном типе ОРО (потенциал образования метана) от категории/вида отходов  $i$ , в год, Гг;

$i$  = категория/вид отходов, принятые для расчета выбросов;

$j$  = тип ОРО;

$R_j$  = рекуперированный  $\text{CH}_4$  на определенном типе ОРО, в год, для которого выполняется инвентаризация, Гг;

$\text{OX}_j$  = коэффициент окисления на определенном типе ОРО в год, для которого выполняется инвентаризация, (дробь).

В нашем случае отсутствует рекуперированный метан.

Количество метана, образующегося из биологически разложимых компонентов отходов, рассчитывается через уравнение 2 [5]:

$$\text{CH}_4 \text{ образованный} = \text{DDOCm decompr} \cdot F \cdot 16/12, \quad (2)$$

где  $\text{CH}_4 \text{ образованный}$  = количество  $\text{CH}_4$ , образованного в год, учитываемы в кадастре, Гг;

$\text{DDOCm decompr}$  = масса разложимого органического углерода, распавшегося в год, для которого выполняется инвентаризация, Гг;

$F$  = доля  $\text{CH}_4$ , по объему, в образованном на ОРО;

$16/12$  = соотношение молекулярного веса  $\text{CH}_4/\text{C}$  (соотношение).

Общее уравнение ЗПП отражает активность протекания реакции разложения, которая пропорциональна количеству остающегося реагента, то есть массе нестойкого органического углерода отходов, находящегося в благоприятных для разложения условиях (DDOCm). При этом масса такого вещества, которая останется неразложившейся за определенный период времени в общем виде выражена через уравнение 3 [5]:

$$\text{DDOCmt} = \text{DDOCm}_0 \cdot e^{-kt}, \quad (3)$$

где  $\text{DDOCmt}$  = масса способного к разложению органического углерода, который останется ко времени  $t$  на ОРО, Гг;

$\text{DDOCm}_0$  = масса нестойкого DOC, помещенного на ОРО на момент начала реакции (во время 0), Гг;

$k$  = постоянная реакции;

$t$  = время, прошедшее с момента начала реакции, года.

Для расчета метана, выделившегося в течение 1 расчетного года, в общем случае значение  $\text{DDOCm}$ , разложившегося на  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  за период  $T$  в промежутке между  $(t-1)$  и  $t$ , выражено в уравнении 4 [5]:

$$\text{DDOCm decomprT} = \text{DDOCm}_0 \cdot [e^{-k(t-1)} - e^{-kt}], \quad (4)$$

где  $\text{DDOCm decomprT}$  = масса органического углерода ( $\text{DDOCm}$ ), разложившегося в период между  $(t-1)$  и  $t$ , Гг;

$T$  = означает год, для которого производится расчет, относительно начального года 0;

$\text{DDOCm}_0$  = масса DOC, помещенного на ОРО на момент начала реакции (во время 0), Гг;

$k$  = постоянная реакции;

$t$  = время, прошедшее с момента начала реакции, года.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описание технологического процесса. Технологическая схема пиролиза древесины включает несколько этапов, которые последовательно осуществляются для получения различных продуктов. Пиролиз древесины — это термическое разложение древесного сырья в условиях ограниченного доступа кислорода, что позволя-

ет получить уголь, газ и жидкие продукты (смолы, дегти и т.д.). Ниже приведена общая схема процесса пиролиза древесины.

### Подготовка сырья

Сортировка и измельчение: древесину сортируют, удаляя посторонние примеси, и измельчают до необходимого размера для равномерного прогрева.

### Сушка

Сырье высушивают, чтобы уменьшить содержание влаги. Оптимальное содержание влаги – около 10-15%.

### Загрузка в пиролизную установку

Подача сырья: высушенное древесное сырье подается в пиролизный реактор (установку) (Рис. 1).

### Пиролиз

*Нагрев:* В реакторе древесина нагревается до температуры 400-700°C в условиях ограниченного доступа кислорода.

*Термическое разложение:* В процессе нагрева происходит разложение органических веществ древесины на углерод (уголь), летучие вещества и жидкие продукты.

### Разделение продуктов пиролиза:

*Уголь:* твёрдый углеродный остаток (уголь) отделяется и выводится из реактора.

*Газовые продукты:* летучие вещества (газы) собираются и охлаждаются. Эти газы могут содержать водород, метан, угарный газ, углекислый газ и легкие углеводороды.

*Жидкие продукты:* в процессе охлаждения летучие вещества конденсируются в жидкие продукты, такие как древесная смола и уксусная кислота (Рис. 1).

Подставив исходные данные в описанную в предыдущем разделе методологию, получим оценочные результаты по сокращению массы

выбросов  $\text{CH}_4$  и, соответственно,  $\text{CO}_2$ -экв при переработке КДО в биоуголь. Результаты представлены в таблице 1 и на рисунках 2 и 3.

Полученный эффект по сокращению выбросов  $\text{CO}_2$ -экв может быть оформлен и тиражирован как климатический проект, что позволит улучшить экономические показатели внедрения технологии пиролиза древесины для сокращения выбросов парниковых газов на полигонах хранения древесных отходов. Накопленный дисконтированный положительный денежный поток, при ставке дисконтирования 17% и стоимости 1000 руб. за 1 тонну  $\text{CO}_2$ -экв. (углеродную единицу), составит более 21,8 млн руб. при горизонте планирования 15 лет (Рис. 4).

### ВЫВОДЫ

Применение технологии пиролиза для переработки КДО в биоуголь для получения углеродных единиц путем утилизации древесных отходов, показало положительный эффект по сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу. Накопленный годовой эффект, при массе переработанного КДО 50 тыс. тонн/год, может достигать более 50 тыс. углеродных единиц в год на пятнадцатый год реализации и может быть рекомендована для детальной проработки и оценки целесообразности инвестиций в проект.

Представленные тематические исследования показывают пути эффективной переработки древесных отходов, образовавшихся в результате хозяйственной деятельности перерабатывающей промышленности, например ЦБК. Результаты этой работы могут быть использованы для повышения устойчивости деревообрабатывающей промышленности и промышленных регионов.

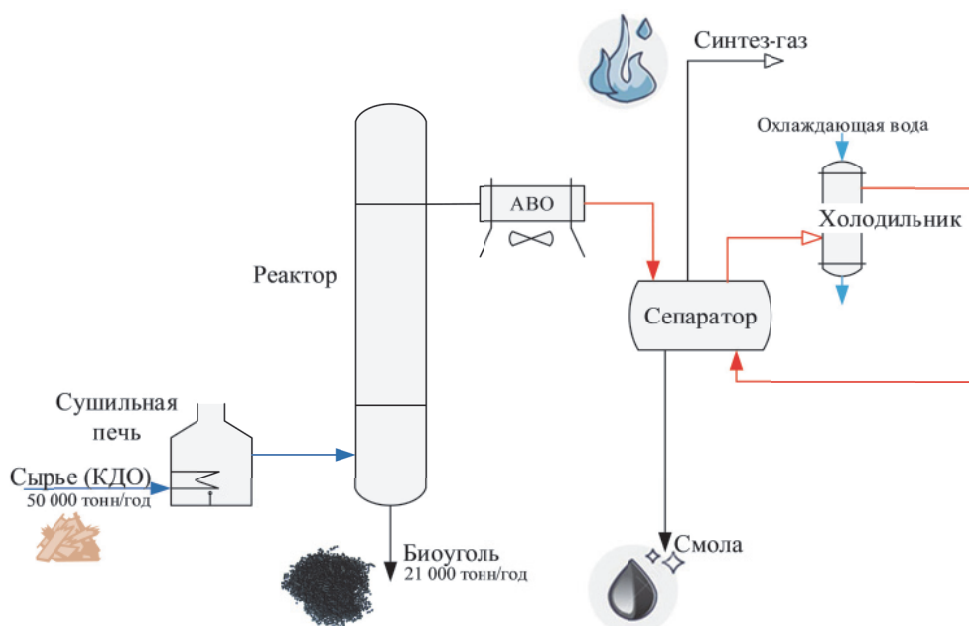


Рисунок 1. Принципиальная схема установки пиролиза древесины

**Таблица 1.** Результаты расчета сокращения выбросов CH<sub>4</sub>

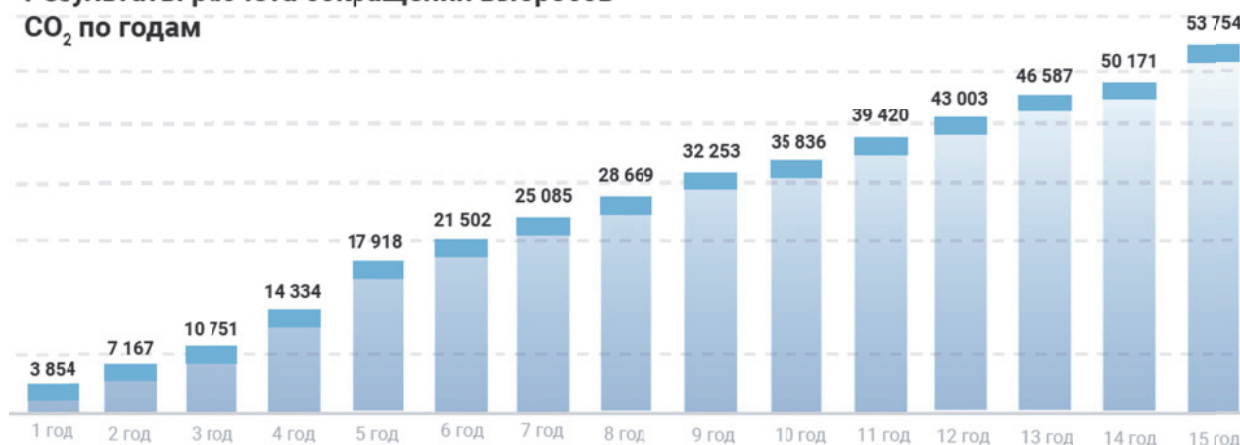
Исходные данные	Значения	Ед. измерения
Масса древесных отходов, поступающая на пиролиз	50000	тонн/год
DOC	43%	массовый процент
R <sub>j</sub>	0	коэф.
OPO	0,6	коэф.
OX	0	коэф.
t	35	время полураспада (годы)
k	0,02	коэф. постоянная реакции
DDOCm0	21 500,0	тонн/год, масса нестойкого DOC, помещенного на OPO на момент начала реакции
DDOCmt	10 750,0	масса способного к разложению органического углерода, который останется ко времени t на OPO
DDOCm decompT	215,02	масса органического углерода (DDOCm), разложившегося в период между (t-1) и t
F	0,50	доля CH <sub>4</sub> , по объему, в образованном на OPO
CH <sub>4</sub> образованный	143,34	количество CH <sub>4</sub> , образованного в год, учитываемы в кадастре

**Результаты расчета сокращения выбросов CH<sub>4</sub> по годам**



**Рисунок 2.** Диаграмма накопленного эффекта сокращения выбросов метана за 15 лет

**Результаты расчета сокращения выбросов CO<sub>2</sub> по годам**



**Рисунок 3.** Диаграмма накопленного эффекта сокращения CO<sub>2</sub>-экв за 15 лет



Рисунок 4. Дисконтированный положительный денежный поток

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 № 666.
2. «О сокращении выбросов парниковых газов «Постановление Правительства РФ от 14.03.2022 N 355 «О критериях отнесения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к регулируемым организациям».
3. IEA (2016), Energy Policies Beyond IEA Countries: Eastern Europe, Caucasus and Central Asia 2015, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/energy-policies-beyond-iea-countries-eastern-europe-caucasus-and-central-asia-2015>, Licence: CC BY 4.0.
4. Ulyev, L., Vasiliev, M., Boldyryev, S., 2018. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions. J. Environ. Manage. 222, 454–464. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.05.062.
5. Приказ Минприроды России от 27.05.2022 N 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.07.2022 N 69451).
6. ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021 Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации.
7. Huu-Tuan Tran, Chitsan Lin, Xuan-Thanh Bui, Huu-Hao Ngo, Nicholas Kiprotich Cheruiyot, Hong-Giang Hoang, Chi-Thanh Vu Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. Current and future perspectives // Science of The Total Environment. – Vol. 753, 2021. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142250.
8. Erasmo Cadena, Joan Colón, Adriana Artola, Antoni Sánchez & Xavier Font. Environmental impact of two aerobic composting technologies using life cycle assessment. // The International Journal of Life Cycle Assessment – Volume 14, pages 401–410, (2009).
9. Yaman C, Anil I, Alagha O, Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies, Journal of Cleaner Production (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121432>.
10. Deliang Xu, Liu Yang, Ming Zhao, Jinrui Zhang, Syed Shatir A. Syed-Hassan, Hongqi Sun, Xun Hu, Hong Zhang, Shu Zhang. Conversion and transformation of N species during pyrolysis of woodbased panels: A review. // Environmental Pollution Vol. 270, 2021, 116120. doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116120.
11. Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 38, 68-94.
12. Demirbas, A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 72(2), 243-248.
13. Antonio Soria-Verdugo, Marco Tomasi Morgano, Hartmut Mätzing, Elke Goos, Hans Leibold, Daniela Merz, Uwe Riedel, Dieter Stapf. Comparison of wood pyrolysis kinetic data derived from thermogravimetric experiments by model-fitting and model-free methods. // Energy Conversion and Management. Vol. 212, 2020, 112818doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112818.
14. N Nurhadi, Sapta Rianda, Cipta Irawan and Gatut Pujo Pramono. Biochar production investigation from pyrolysis of lamtoro wood as a coal blend for fuel substitution in steam power plants. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 749 (2021) 012037. doi:10.1088/1755-1315/749/1/012037.
15. Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan.
16. Asterios Papageorgiou, Elias S. Azzi, Anja Enell, Cecilia Sundbera. Biochar produced from wood waste for soil remediation in Sweden: Carbon sequestration and other environmental impacts // Science of the Total Environment. – Vol 776. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145953>.
17. Przemyslaw Maziarka, Peter Sommersacher, Xia Wang, Norbert Kienzl, Stefan Retschitzegger, Wolter Prins, Niklas Hedin, Frederik Ronsse. Tailoring of the pore structures of wood pyrolysis chars for potential use in energy storage applications. // Applied Energy. Vol. 286, 2021, 116431. doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116431.

## ASSESSMENT OF THE USE OF WOOD PYROLYSIS TECHNOLOGY TO REDUCE CO<sub>2</sub> EMISSIONS AT WOOD WASTE LANDFILLS

© 2024 A.V. Vlasov, I.D. Akhmedova<sup>2</sup>, D.O. Perfiliev<sup>1</sup>, M.A. Vasiliev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LLC "Ai-EKSP", Moscow, Russia

<sup>2</sup> Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

The processing of wood waste is becoming an increasingly urgent problem in connection with the growth of the consumption of wood materials and an increase in waste volumes that are formed as a result of logging, woodworking and furniture industry. Traditional methods of disposal of wood waste, such as burning and burial, cause significant environmental problems, including greenhouse gas emissions and soil and water pollution. In this context, wood pyrolysis is a promising processing method, which allows not only to reduce waste volume, but also to obtain valuable products, such as biodegor, biomers and synthesis gas. This article considers the effectiveness of the use of wood pyrolysis technology as a technology for reducing emissions from storage of wood waste (KDO). The work contains the results of calculating the reduction of the specific emissions of CO<sub>2</sub> during the processing of dense mobile waste into a biodegor, as well as a potential effect when processing a KDO with a volume of 100 thousand m<sup>3</sup> per year, including the accumulated effect with a planning horizon of 15 years.

*Key words:* wood waste; pyrolysis; greenhouse gases; Biode, carbon units.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4-170-176

EDN: FYNLUH

### REFERENCES

1. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 04.11.2020 № 666.
2. «O sokrashchenii vybrosov parnikovyh gazov «Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 14.03.2022 N 355 «O kriteriyah otneseniya yuridicheskikh lic i individual'nyh predprinimatelej k reguliruemyim organizacijam»».
3. IEA (2016), Energy Policies Beyond IEA Countries: Eastern Europe, Caucasus and Central Asia 2015, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/energy-policies-beyond-iea-countries-eastern-europe-caucasus-and-central-asia-2015>, Licence: CC BY 4.0.
4. Ulyev, L., Vasiliev, M., Boldyryev, S., 2018. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions. J. Environ. Manage. 222, 454–464. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.05.062.
5. Prikaz Minprirody Rossii ot 27.05.2022 N 371 «Ob utverzhdenii metodik kolichestvennogo opredeleniya ob'emov vybrosov parnikovyh gazov i pogloshchenij parnikovyh gazov» (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 29.07.2022 N 69451).
6. GOST R ISO 14064-1-2021 Gazy parnikovye. CHast' 1. Trebovaniya i rukovodstvo po kolichestvennomu opredeleniyu i otchetnosti o vybrosah i pogloshchenii parnikovyh gazov na urovne organizacii.
7. Huu-Tuan Tran, Chitsan Lin, Xuan-Thanh Bui, Huu-Hao Ngo, Nicholas Kiprotich Cheruiyot, Hong-Giang Hoang, Chi-Thanh Vu Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. Current and future perspectives // Science of The Total Environment. – Vol. 753, 2021. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142250.
8. Erasmo Cadena, Joan Colón, Adriana Artola, Antoni Sánchez & Xavier Font. Environmental impact of two aerobic composting technologies using life cycle assessment. // The International Journal of Life Cycle Assessment – Volume 14, pages 401–410, (2009).
9. Yaman C, Anil I, Alagha O, Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies, Journal of Cleaner Production (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121432>.
10. Deliang Xu, Liu Yang, Ming Zhao, Jinrui Zhang, Syed Shatir A. Syed-Hassan, Hongqi Sun, Xun Hu, Hong Zhang, Shu Zhang. Conversion and transformation of N species during pyrolysis of woodbased panels: A review. // Environmental Pollution Vol. 270, 2021, 116120. doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116120.
11. Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 38, 68–94.
12. Demirbas, A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 72(2), 243–248.
13. Antonio Soria-Verdugo, Marco Tomasi Morgano, Hartmut Mätzing, Elke Goos, Hans Leibold, Daniela Merz, Uwe Riedel, Dieter Stapf. Comparison of wood pyrolysis kinetic data derived from thermogravimetric experiments by model-fitting and model-free methods. // Energy Conversion and Management. Vol. 212, 2020, 112818doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112818.
14. N Nurhadi, Sapta Rianda, Cipta Irawan and Gatut Pujo Pramono. Biochar production investigation from pyrolysis of lamtoro wood as a coal blend for fuel substitution in steam power plants. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 749 (2021) 012037. doi:10.1088/1755-1315/749/1/012037.
15. Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan.
16. Asterios Papageorgiou, Elias S. Azzi, Anja Enell, Cecilia Sundbera. Biochar produced from wood waste for soil remediation in Sweden: Carbon sequestration and other environmental impacts // Science of the Total Environment. – Vol 776. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145953>.
17. Przemyslaw Maziarka, Peter Sommersacher, Xia Wang, Norbert Kienzl, Stefan Retschitzegger, Wolter Prins, Niklas Hedin, Frederik Ronsse. Tailoring of the pore structures of wood pyrolysis chars for potential use in energy storage applications. // Applied Energy. Vol. 286, 2021, 116431. doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116431.

Alexander Vlasov, Researcher at the Institute of Applied Information Technologies, MPEI.

Irina Akhmedova, PhD in Geographical Sciences, Associate Professor of the Higher Ecological School, Yugra State University, Ecologist-Auditor of the Association of Ecologists-Auditors «National Ecological Audit Chamber» (AEA «NEAP») E-mail: [idakhmedova@mail.ru](mailto:idakhmedova@mail.ru).

Denis Perfiliev, General Director.

Mikhail Vasiliev, Researcher.