

Отходы производства и потребления

DOI: 10.34828/UdSU.2024.11.16.010

УДК 662.638

М.В. Мурадова, В.Е. Ситникова, С.Н. Мокрин, А.А. Пономарева

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ БЕРЕЗОВОГО ЛУБА И СОСНОВЫХ ИГОЛОК

Аннотация. Данная статья посвящена исследованию теплотворной способности и особенностям термического разложения биотопливных композитов на основе луба и сосновых иголок. Результаты калориметрических исследований показали, что значения низшей теплоты сгорания пеллет всех составов находятся на уровне не ниже 18,4 кДж/кг. Благодаря термогравиметрическому анализу были установлены основные диапазоны и этапы термического разложения композитных пеллет, а также оценены основные индексы горения. Исследования, проведенные в данной работе, являются важным шагом к эффективному использованию экологически чистого вида топлива на основе берёзового луба и сосновых иголок в топливной промышленности.

Ключевые слова: березовый луб, сосновые иголки, термическое разложение, индексы горения, низшая теплота сгорания, термогравиметрический анализ, биотопливные композиты.

Для цитирования: Особенности термического преобразования топливных композитов на основе березового луба и сосновых иголок / М.В. Мурадова, В.Е. Ситникова, С.Н. Мокрин, А.А. Пономарева // Управление техносферой: электрон. журнал, 2024. Т.7. Вып.2. URL: <https://technosphere-ing.ru> С. 302 – 318. DOI: 10.34828/UdSU.2024.11.16.010

Актуальность

Современные технологии лесозаготовки концентрируются на заготовке стволов, как на самой ценной части древесины. Это приводит к тому, что на местах лесозаготовок остаются многочисленные отходы. В настоящее время наименее используемым отходом деревообрабатывающей и лесной промышленности является кора. Объёмы накопления коры в России каждый

год составляют около 30 млн м³ [1]. Кора состоит из луба (внутренний слой) и корки (внешний слой).

Луб – слой древесной коры, характеризующийся способностью впитывать воду, что позволяет его использовать для получения сорбентов [2]. Несмотря на то, что древесный луб является естественным продуктом лесозаготовительной деятельности, его неправильная утилизация может причинить вред окружающей среде. Накопление больших количеств древесного луба на определенной территории может препятствовать нормальному росту и развитию растений, что в свою очередь может снизить биоразнообразие в данном регионе. [3] Это связано с тем, что процесс разложения абсолютно сухого луба длится 5-7 лет в почве [4].

Для минимизации негативного воздействия древесного луба на окружающую среду необходимо правильно утилизировать его и следить за тем, чтобы отходы лесозаготовки не скапливались на больших площадях и не создавали потенциальные опасности для окружающей среды. Существует несколько вариантов утилизации луба: путем переработки, компостирования или использования в производстве биотоплива.

В данной работе будет рассмотрен способ утилизации луба в качестве основного компонента для производства биотопливных пеллет с добавлением сосновых иголок. Сосновые иголки были выбраны в качестве второй составляющей пеллет из-за широкого распространения сосны от экваториальных до приполярных широт в Евразии.

В работе [5] исследовались брикеты из сосновой хвои и глины в качестве связующего материала в соотношении 80:20 соответственно. Результаты исследования процесса горения показали, что биобрикеты сгорают с меньшим количеством дыма, чем у топливной древесины. Также анализ показал, что сосновая хвоя является отличным сырьем для брикетирования из-за низкой

зольности, низкой влажности и относительно высокого содержания углерода с теплотворной способностью 22259 кДж/кг.

Древесные биотоплива представляют собой вид биотоплива, который производится из древесных материалов или отходов. Они могут включать в себя древесные пеллеты, брикеты, древесные отходы, щепу, опилки и другие формы древесной биомассы. Древесные биотоплива широко используются для производства тепла и энергии в различных отраслях, таких как отопление домов, производство электроэнергии, производство пара и другие [6, 7]. Внедрение древесных биотоплив является актуальной темой в современном мире, поскольку это позволяет снизить зависимость от ископаемых видов топлива, таких как нефть и уголь, и уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу [6]. Такой вид топлива является экологически чистым, так как при их сжигании выделяется меньше вредных веществ, чем при сжигании ископаемых видов топлив. Также древесные биотоплива изготавливаются из возобновляемых ресурсов, что делает их доступными и устойчивыми источниками энергии. Кроме того, использование этих топлив является эффективным способом утилизации отходов лесозаготовки и иных древесных отходов.

Основным недостатком древесных биотоплив является низкая энергетическая плотность по сравнению с традиционными видами топлив, соответственно требуются большие объёмы топлива. В целом, внедрение древесных биотоплив имеет свои преимущества и недостатки, и важно сбалансировать использование этого типа топлива с учетом его воздействия на окружающую среду и общественные нужды.

Целью данной работы являлось изучение термического преобразования топливных композитов на основе берёзового луба и сосновых иголок, а также изучению влияния этого процесса на характер термического разложения и горения систем луб-сосна.

Методы и материалы

Для исследований, приведённых в работе, использовались иголки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и луб березы повислой (*Betula pendula*). Исходные материалы измельчались механически ротационным измельчителем, после чего проводился отбор фракций вручную (ситовым рассевом) от 0,25 мм до 0,8 мм для древесного луба и от 0,2 мм до 0,25 мм для сосновых иголок (хвои). Биотопливные пеллеты были сформированы с помощью пресса лабораторного гидравлического ПГР-10 при давлении 70 бар для всех образцов.

С помощью термогравиметрического анализатора Netzsch TG 209 F1 Libra (Германия) определялись термическая стабильность и структуры летучих компонентов полученных образцов биотопливных пеллет. Данный метод анализа заключается в непрерывной регистрации зависимости изменения массы образца от времени и температуры [8]. В эксперименте исследовались пробы хвои и луба в атмосфере синтетического воздуха (азот ОЧ 5.4 ТУ 2114-004-37924839-2016 (ПТК «Криоген», Россия) объемная доля N₂ не менее 99,9994 % и кислород ВЧ 5.0 ТУ 2114-006-37924839-2016 (ПТК «Криоген», Россия) объемная доля O₂ не менее 99,999 %) при объёмной концентрации кислорода 20 %. Все измерения проводились при следующих параметрах: расход воздуха 50 мл/мин, диапазон нагрева 25–900 °С, скорость повышения температуры 10 °С/мин. Масса каждой пробы составляла 16 ± 1 мг.

Для определения низшей теплоты сгорания смесей луба и сосновых иголок использовался калориметр ИКА С6000 (Германия), оснащенный термостатом ИКА RC2 basic (Германия). В эксперименте использовались пробы сосновых иголок, березового луба и их смесей с массовым содержанием хвои 85 %, 50 %, 30 % и 15 %. Образцы предварительно измельчались в порошок и взвешивались на аналитических весах Ohaus Explorer EX324/AD (США) с точностью до 0,1 мг. Температура воды в калориметре до начала эксперимента поддерживалась постоянной в калориметре термостатом. В ходе эксперимента

в калориметрической бомбе, погруженной в водяную рубашку, сжигалось известное количество пробы в кислородной среде (кислород ВЧ 5.0 ТУ 2114-006-37924839-2016 (ПТК «Криоген», Россия) объемная доля O_2 не менее 99,999 %). Количество тепла, выделившегося при горении образцов, пропорционально изменению температуры воды в калориметре, известной теплоёмкости всей системы и массе образца. Предварительно была проведена калибровка калориметра с использованием эталонного вещества – бензойной кислоты Национального бюро стандартов (NBS-Standard Sample 39 J) с известной и гарантированной теплотой сгорания. Для получения достоверных экспериментальных данных исследовались по три образца каждой пробы. Статистическая обработка данных калориметрии включала в себя определение среднего значения по трем измерениям и вычисление стандартного отклонения с помощью пакета анализа данных Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Калориметрические измерения. Для оценки удельного энерговыделения исследуемых пеллет были проведены эксперименты по определению низшей теплоты сгорания образцов березового луба, сосновых иголок и их смесей. На рис. 1 приведены результаты калориметрического исследования. На графике по оси абсцисс приведена массовая концентрация сосновых иголок в пробе, по оси ординат – низшая теплота сгорания исследуемых смесей в кДж/кг. Планками погрешностей отмечено стандартное отклонение.

Как видно из рис. 1, линейной зависимости низшей теплоты сгорания от содержания сосновых иголок в пробе не наблюдается. Значение низшей теплоты сгорания образца из сосновых иголок соответствует данным, приведенным в статье [8]. Также из графика можно отметить, что калорийность сосновых иголок в среднем на ~6,3 % выше, чем у березового луба. Значительное повышение калорийности пеллет наблюдается при содержании

сосны от 40 %. Теплотворная способность полученных пеллет выше, чем у чаще используемых дров [9] и брикетов из опилок и стружек [10].

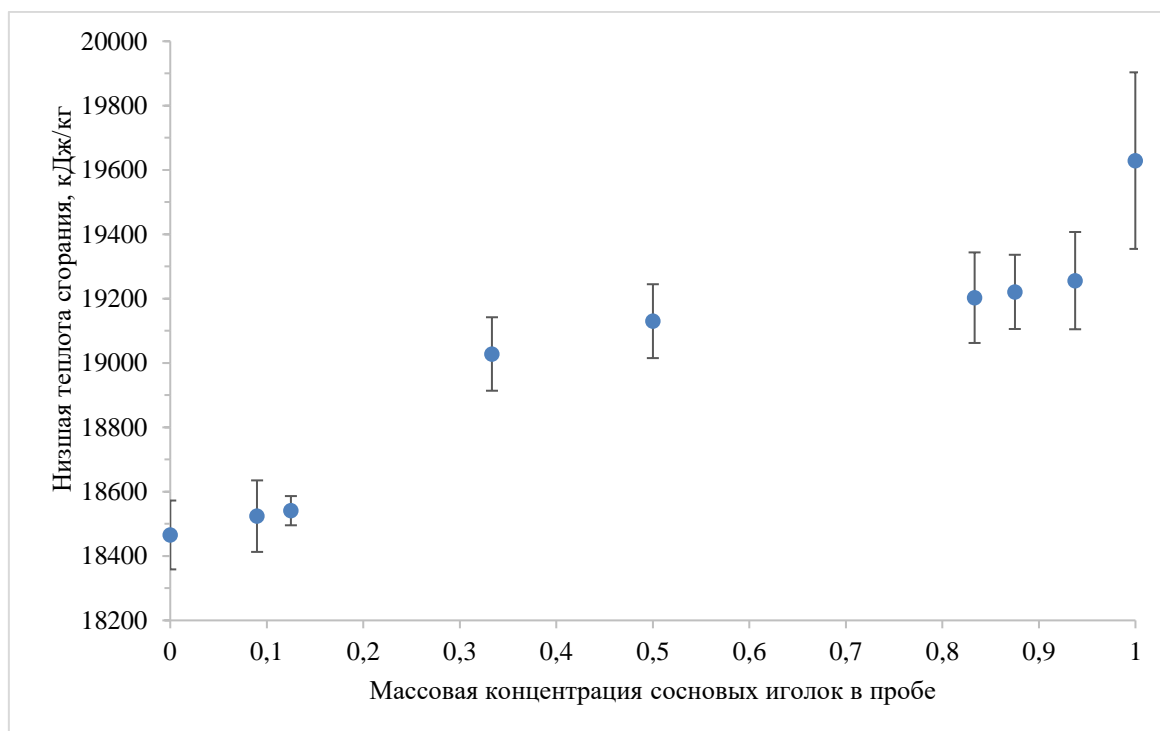


Рис. 1. Зависимость низшей теплоты сгорания смеси частиц березового луба и сосновых иголок массовой концентрации сосны в пробе

Таким образом, использование топливных композитов на основе сосновых иголок и берёзового луба является перспективным для сжигания на промышленных энергогенерирующих объектах без каких-либо затрат на модернизацию и переоснащение топочного оборудования.

Термогравиметрические исследования. Полученная термогравиметрическая (ТГ) кривая разложения берёзового луба, изображённая на рис. 2А, отражает последовательность физических и химических процессов, происходящих при нагревании. На начальной стадии (до 250 °С) идёт процесс дегидратации, во время которого влага, находящаяся в образцах, испаряется [8]. На данном этапе наблюдается постепенное уменьшение массы образца, при чём масса пеллеты из чистого луба уменьшается на 6 %, в то время как массы сосновой пеллеты и композитов на основе луба и сосновых иголок

уменьшаются на 9%. Далее следует основной этап (250–550 °С), при котором начинается интенсивное термическое разложение органических компонентов пеллет. Этот процесс включает в себя термодеструкцию целлюлозы, гемицеллюлозы и других органических соединений, присутствующих в лубе и сосновых иголках [8]. При дальнейшем нагревании образца (от 550 °С) поведение кривой ТГ изменяется за счёт уменьшения скорости термодеструкции.

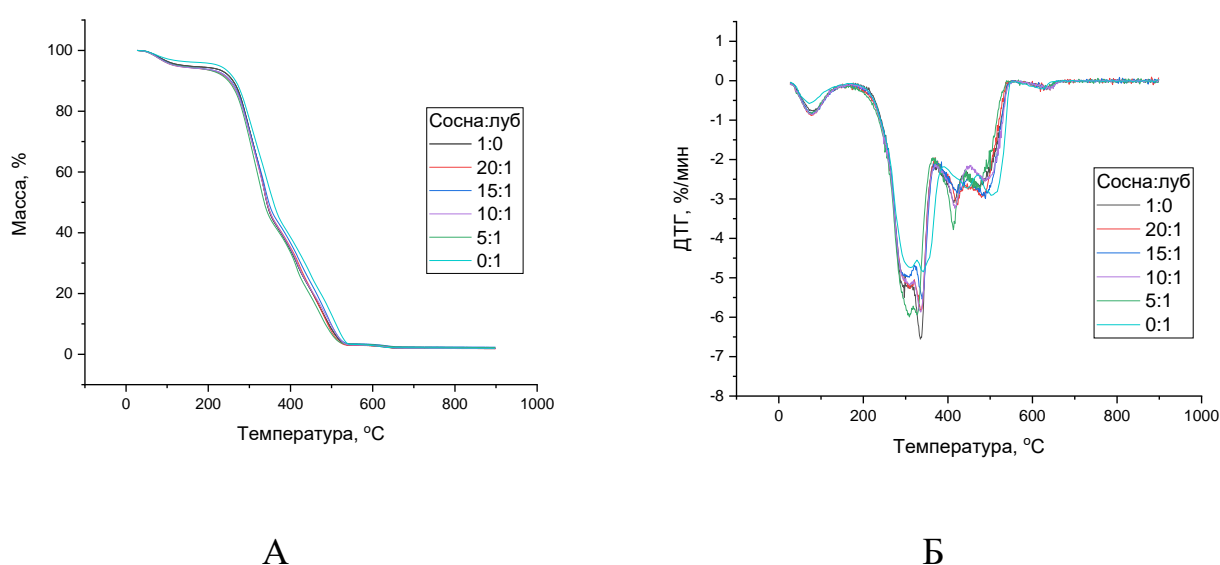


Рис. 2. Термическое разложение пеллет из березового луба и сосновых иголок в различных соотношениях 2А – ТГА; 2Б – ДТГ

Полученная дифференциальная термогравиметрическая (ДТГ) кривая, изображённая на рис. 2Б, свидетельствует о том, что процесс разложения исследуемых пеллет делится на несколько этапов. Этот процесс можно разделить на шесть стадий: (1) удаление влаги и легко летучих компонентов при температуре <150 °С, (2) разложение экстрактивных веществ при температуре 150-330 °С, (3) разложение гемицеллюлозы происходит в диапазоне температур 330-375 °С, (4) 375-460 °С, главным образом, разложение целлюлозы и лигнина, (5) при температуре 460-560 °С разлагается лигнин,

который имеет относительно высокое содержание углерода по сравнению с целлюлозой и гемицеллюлозой и способствует образованию обугливания, (6) разложение коксового остатка происходит при температуре 560-660 [8]. В табл. 1 приведены максимальные температуры для каждой из шести стадий.

Таблица 1

Температура максимумов для каждой стадии термической деструкции

Состав пеллеты. Сосна:луб	$T_{\max 1},$ °C	$T_{\max 2},$ °C	$T_{\max 3},$ °C	$T_{\max 4},$ °C	$T_{\max 5},$ °C	$T_{\max 6},$ °C
1:0	84,1	296,0	332,9	411,9	468,6	641,7
20:1	76,8	312,1	334,6	422,4	477,6	619,3
15:1	76,8	307,0	337,9	427,2	488,1	628,1
10:1	77,6	311,3	337,1	417,4	487,4	641,6
5:1	77,6	308,8	327,9	412,6	469,3	638,1
0:1	72,8	311,3	341,9	444,7	501,2	622,8

Из табл. 1 видно, что при добавлении сосновых иголок в состав пеллет происходит смещения максимума в более высокотемпературную область при первом этапе разложения. Остальные максимумы процессов разложения не показали четкую корреляцию от состава.

Величины зольного остатка для каждой пробы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Величины зольного остатка

Состав пеллеты. Сосна:луб	Зольный остаток, масс. %
1:0	1,88
20:1	1,84
15:1	2,33
10:1	1,90
5:1	2,19
0:1	1,97

Из табл. 2 можно заметить, что величина зольного остатка для всех образцов составляет ~2 %.

Определение характеристических индексов процесса горения. В процессе термогравиметрического анализа одновременно регистрировались убыль массы, время и температуры, которые использовались для составления профиля термического разложения. Из полученных данных определялись тепловые параметры, включавшие температуру воспламенения T_i , температуру выгорания $T_{b/o}$ и пиковую температуру T_{max} , для описания характеристик процесса горения. Эти параметры отражают тепловое поведение органического вещества в процессе термического разложения и определяют окончание горения или выгорание. Данные параметры были определены методом, описанным в статье [11].

Температура воспламенения T_i – наименьшая температура вещества, при которой пары над поверхностью горючего вещества выделяются с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение. Температура выгорания $T_{b/o}$ была определена как температура, при которой профиль ДТГ достигает точки перегиба кривой после основного этапа разложения [11], в то время как пиковая температура T_{max} соответствует температуре при максимальной скорости потери веса. На основе выявленных параметров были определены характеристические индексы процесса термического разложения согласно формулам, представленным в работе [12].

Индекс воспламенения D_i определялся из следующего уравнения:

$$D_i = \frac{(dw/dt)_{max}}{T_i \times T_{b/o}}, \quad (1)$$

где $(dw/dt)_{max}$ – максимальная скорость убыли массы. T_i – температура воспламенения, а $T_{b/o}$ – соответствующая температура выгорания.

Индекс воспламенения D_i отражает способность топлива к воспламенению. Чем он выше, тем легче воспламеняется топливо.

Проводя анализ полученных значений индекса воспламенения полученных образцов, можно наблюдать, что способность топлива воспламеняться у сосновых иголок выше, чем у березового луба (см. табл. 3).

Также для оценки процессов горения сосновых иголок и луба в атмосфере синтетического воздуха был рассчитан индекс воспламеняемости C . Индекс воспламеняемости C определялся из уравнения:

$$C = \frac{(dw/dt)_{max}}{T_i^2} . \quad (2)$$

Индекс воспламеняемости указывает на тенденцию изменения кривой ТГ от точки воспламенения до максимальной скорости потери массы и характеризует реакционную способность исследуемого образца в момент воспламенения, его горючесть. Чем больше индекс воспламеняемости, тем больше горючесть топлива в данных условиях.

Согласно результатам расчётов, представленных в табл. 3, горючесть пеллеты из сосновых иголок выше, чем у исследуемых композитов и пеллет из березового луба. Можно заметить, что индекс воспламеняемости C примерно одинаковый у всех композитов.

Индекс выгорания $C_{b/o}$, значения которого представлены в табл. 3, является характеристикой степени выгорания исследуемых образцов берёзового луба и сосновых иголок и определяется согласно уравнению:

$$C_{b/o} = \frac{f_1 \times f_2}{\tau_0} , \quad (3)$$

где $f_1 = (m_0 - m_1) / \Delta m$ – отношение изменения масс образца до и после воспламенения, зависящая от состава и качества топлива; $f_2 = (m_0 - m_2) / \Delta m$ – скорость изменения массы после выгорания; τ_0 – время выгорания; m_0 – первоначальная масса навески, m_1 – масса навески в момент воспламенения, m_2 – масса навески в момент выгорания, $\Delta m = m_2 - m_1$.

$C_{b/o}$ сочетает в себе факторы влияния устойчивости горения топлив и выгорания в пламени: чем больше его значение, тем лучше характеристики

горения топлива. Для пеллет из чистых компонентов наблюдается относительно большая разница в значениях индекса выгорания: характеристики горения для пеллеты из сосновых иголок лучше, чем из березового луба. Однако оценить индексы выгорания для их композитов сложнее.

Комплексный индекс горения S является обобщенной характеристикой процесса горения. Его величиной можно оценить активность процесса горения исследуемого образца. Более высокое значение S указывает на лучшие характеристики горения образцов. Комплексный индекс горения S определялся согласно уравнению:

$$S = \frac{(dw/dt)_{max} \times (dw/dt)_{mean}}{T_i^2 \times T_{b/o}}, \quad (4)$$

где $(dw/dt)_{mean}$ – средняя скорость горения.

По рассчитанным и представленным в табл. 3 комплексным индексам горения луба и угля можно сделать вывод, что процесс горения сосновых иголок и всех исследуемых композитов на основе луба и иголок протекает активнее, чем процесс горения березового луба.

Рассчитанные индексы процесса горения пеллет из чистого луба, чистой сосны и их композитов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчёта характеристических индексов процесса горения пеллет из чистого луба, чистой сосны и их композитов в атмосферной среде

Содержание сосна:луб	$T_i, ^\circ\text{C}$	$T_{max}, ^\circ\text{C}$	$T_{b/o}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, \text{мин}$	$(dw/dt)_{max}, \%/ \text{мин}$	$D_i \cdot 10^{-5}$	$C \cdot 10^{-5}$	$C_{b/o} \cdot 10^{-3}$	$S \cdot 10^{-8}$
1:0	252,8	335,8	436,8	18,4	6,6	1,8	2,4	4,6	3,8
20:1	249,7	335,7	436,7	18,7	5,9	1,6	2,2	5,2	3,4
15:1	246,9	339,9	445,9	19,9	5,6	1,8	2,1	2,9	3,8
10:1	248,2	336,2	438,2	19,0	5,9	1,6	2,2	4,7	3,4
5:1	243,8	309,8	431,8	18,8	6,0	2,0	2,2	3,7	3,6
0:1	251,9	341,9	466,9	21,5	4,9	1,3	1,8	2,2	2,7

Из табл. 3, по столбцу с приведенными значениями Δt , также можно заметить, что пеллеты, содержащие только березовый луб, в составе горят медленнее, чем сосновые.

Заключение

В данной работе с использованием методов термогравиметрического и калориметрического анализа были выполнены исследования, позволившие установить основные характеристики процессов горения пеллет из березового луба и сосновых иголок. В результате калориметрического исследования было установлено, что величина теплоты сгорания зависит от концентрации частиц сосновых иголок в смеси с березовым лубом нелинейно. Также было определено, что значения низшей теплоты сгорания пеллет всех исследуемых составов не ниже 18,4 кДж/кг, что примерно сопоставимо с используемыми в качестве топлива древесными горючими, соответственно, возможно использование полученных пеллет в топливной промышленности.

По данным термического разложения разработанных пеллет были установлены диапазоны основных этапов горения образцов и их зольность, а также температуры максимумов рассмотренных стадий. Дополнительно, используя термогравиметрические данные, произведены оценки основных индексов горения образцов.

Проведенные исследования позволят перейти к более эффективному и экологически устойчивому использованию березового луба и сосновых иголок в топливной промышленности.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZNS-2023-0031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболева С.В., Ченцова Л.И., Воронин В.М. Переработка коры осины с получением биологически активных веществ и кормовых продуктов: монография. Красноярск: СибГТУ, 2013. 77 с.
2. Веприкова Е.В., Кузнецова С.А., Скворцова Г.П. и др. Свойства и применение сорбционных материалов из луба коры берёзы // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. Красноярск, 2008. С. 286 – 292.
3. Володин В.В., Шубаков А.А., Володина С.О. и др. Тенденции в развитии методов утилизации коры и кородревесных отходов длительного хранения (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. Т. 23(5), 2022. С. 611 – 632.
4. Никишов В.Д. Комплексное использование древесины. Лесная промышленность. М., 1985. 261 с.
5. Esteban L. et al. Influence of the size reduction of pine logging residues on the pelleting process and on the physical properties of pellets obtained. URL: www.pellets2006.com, 2006. p. 35.
6. Laschi A., Marchi E., Gonzales-Garcia S. Energy, vol. 103, 2016, p. 469.
7. Александров Н.П., Андросов Ю.А., Соколов Д.А. и др. Исследование технологии получения пеллет // Научно-технический вестник Поволжья. № 12. 2020. С. 85 – 87.
8. Pulla Rose Navilah, Pankaj Kumar Sharma & Amit Kumar Sharma. Characterization, thermal and kinetic analysis of *Pinus roxburghii*. Environment, Development and sustainability, 2021, vol. 23, pp. 8872 – 8894.
9. Самылина В.Г. О «зеленой» и традиционной энергетике в Вологодской области // Экология промышленного производства. 2016. № 2(94). С. 62 – 69.
10. Трубников И.А. Техничко-экономическая целесообразность производства и использования топливных брикетов, гранул и пеллет // Молодёжь и наука: сборник материалов VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных [Электронный ресурс]. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/section13.html>. С. 1 – 4.
11. Lu H.Y., Tian Y.J., Xu D.P. Effect of fractional extraction on the combustion characteristics of four Chinese coals. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2018, vol. 40, pp. 1–8.

12. Song C.Z., Wen J.H., Li Y.Y. and others. Thermogravimetric Assessment of Combustion Characteristics of Blends of Lignite Coals with Coal Gangue. In: Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Mechanics and Mechanical Engineering (ММЕ 2016), Atlantis Press, 2016, pp. 490 – 495.

Поступила в редакцию 03.04.2024

Сведения об авторах

Мурадова Менсура Вахид Кызы

Магистрант 1 курса обучения, лаборант-исследователь. Университет ИТМО, Центр химической инженерии, пр. Кронверкский, 49, Санкт-Петербург, Россия, 197101; Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, литера А, г. Владивосток, 690922.
E-mail: mvmuradova@itmo.ru

Ситникова Вера Евгеньевна

кандидат химических наук, доцент Центра химической инженерии ИТМО. Университет ИТМО, Центр химической инженерии, пр. Кронверкский, 49, г. Санкт-Петербург, 197101. Россия.
E-mail: vesitnikova@itmo.ru

Мокрин Сергей Николаевич

Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией микроргорания Политехнического Института ДВФУ. Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, литера А, г. Владивосток, 690922. Россия.
E-mail: mokrin.sn@dvfu.ru

Пономарева Алина Александровна

Доцент Центра химической инженерии. Университет ИТМО, Центр химической инженерии, пр. Кронверкский, 49, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197101; Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, литера А, г. Владивосток, 690922. Россия.
E-mail: ap_k@inbox.ru

M.V. Muradova, V.E. Sitnikova, S.N. Mokrin, A.A. Ponomareva

PECULIARITIES OF THERMAL TRANSFORMATION OF FUEL COMPOSITES BASED ON BIRCH BAST AND PINE NEEDLES

Annotation. The article is devoted to the study of calorific value and peculiarities of thermal decomposition of biofuel composites based on birch bast and pine needles. The results of calorimetric studies showed that the values of lower calorific value of pellets of all compositions are at the level not lower than 18.4 kJ/kg. Through thermogravimetric analysis, the main ranges and stages of thermal decomposition of composite pellets were established and the main combustion indices were evaluated. The research conducted in this work is an important step towards the effective utilization of environmentally friendly fuel based on birch bast and pine needles in the fuel industry.

Keywords: birch bast, pine needles, thermal decomposition, combustion indices, lower heating value, thermogravimetric analysis, biofuel composites.

For citation: Muradova M.V., Sitnikova V.E., Mokrin S.N., Ponomareva A.A. [Peculiarities of thermal transformation of fuel composites based on birch bast and pine needles] *Upravlenie tekhnosferoi*, 2024, vol. 7, issue 2. (In Russ.) Available at: <https://technosphere-ing.ru/> pp. 302 – 318. DOI: 10.34828/UdSU.2024.11.16.010

REFERENCES

1. Soboleva S.V., Chentsova L.I., Voronin V.M. *Pererabotka kory osiny s polucheniem biologicheskii aktivnykh veshchestv i kormovykh produktov: monografiya* [Processing of aspen bark to obtain biologically active substances and feed products: monograph]. Krasnoyarsk: SibSTU, 2013, 77 p. (In Russ.).
2. Veprikova E.V., Kuznetsova S.A., Skvortsova G.P. and others. *Svoistva i primeneniye sorbtionnykh materialov iz luba kory berezy* [Properties and application of sorption materials from birch bark bast]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya* [Journal of the Siberian Federal University. Chemistry]. Krasnoyarsk, 2008, pp. 286 – 292. (In Russ.).
3. Volodin V.V., Shubakov A.A., Volodina S.O. and others. *Tendentsii v razvitii metodov utilizatsii kory i korodrevesnykh otkhodov dlitel'nogo khraneniya (obzor)* [Trends in the development of methods for recycling bark and long-term storage bark and wood waste (review)]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* [Agricultural science of the Euro-North-East]. 2022, vol. 23(5), pp. 611 – 632. (In Russ.).
4. Nikishov V.D. *Kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny* [Complex use of wood]. *Lesnaya promyshlennost'* [Timber industry]. Moscow, 1985, 261 p. (In Russ.).

5. Esteban L. et al. Influence of the size reduction of pine logging residues on the pelletizing process and on the physical properties of pellets obtained. Available at: www.pellets2006.com, 2006. p. 35.
6. Laschi A., Marchi E., Gonzales-Garcia S. Energy, vol. 103, 2016. p. 469.
7. Aleksandrov N.P., Androsov Yu.A., Sokolov D.A. and others. Issledovanie tekhnologii polucheniya pelletov [Research into pellet production technology]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povol'zh'ya* [Scientific and technical bulletin of the Volga region]. 2020, no. 12, pp. 85–87. (In Russ.).
8. Pulla Rose Havilah, Pankaj Kumar Sharma & Amit Kumar Sharma. Characterization, thermal and kinetic analysis of Pinusroxburghii. Environment, Development and sustainability, 2021, vol. 23, pp. 8872–8894.
9. Samylina V.G. O «zelenoi» i traditsionnoi energetike v Vologodskoi oblasti [About «green» and traditional energy in the Vologda region]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of Industrial Production], 2016, no. 2(94). pp. 62–69. (In Russ.).
10. Trubnikov I.A. Tekhniko-ekonomicheskaya tselesoobraznost' proizvodstva i ispol'zovaniya toplivnykh briketov, granul i pellet [Technical and economic feasibility of production and use of fuel briquettes, granules and pellets]. *Molodezh' i nauka: Sbornik materialov VI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and science: Collection of materials of the VI All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists] [Electronic resource]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011. Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/section13.html>. pp. 1–4. (In Russ.).
11. Lu H.Y., Tian Y.J., Xu D.P. Effect of fractional extraction on the combustion characteristics of four Chinese coals. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2018, vol. 40, pp. 1–8.
12. Song C.Z., Wen J.H., Li Y.Y. and others. Thermogravimetric Assessment of Combustion Characteristics of Blends of Lignite Coals with Coal Gangue. In: Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Mechanics and Mechanical Engineering (MME 2016), Atlantis Press, 2016. pp. 490–495.

Received: 03.04.2024

About the Authors*Muradova Mensura Vahid Kyzу*

1st year master's student, research assistant. ITMO University, Center for Chemical Engineering, Kronverksky Ave., 49, St. Petersburg, Russia, 197101; Far Eastern Federal University, Ajax, 10, letter A, Vladivostok, 690922.

E-mail: mvmuradova@itmo.ru

Sitnikova Vera Evgenievna

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at the ITMO Center for Chemical Engineering. ITMO University, Center for Chemical Engineering, 49 Kronverksky Ave., St. Petersburg, 197101. Russia.

E-mail: vesitnikova@itmo.ru

Mokrin Sergey Nikolaevich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Microcombustion Laboratory of the Polytechnic Institute of the Far Eastern Federal University. Far Eastern Federal University, Ajax, 10, letter A, Vladivostok, 690922. Russia.

E-mail: mokrin.sn@dvfu.ru

Ponomareva Alina Alexandrovna

Associate Professor at the Center for Chemical Engineering. ITMO University, Center for Chemical Engineering, Kronverksky Ave., 49, St. Petersburg, 197101; Far Eastern Federal University, Ajax, 10, letter A, Vladivostok, 690922. Russia

E-mail: ap_k@inbox.ru