

УДК 662.715.3

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИОМАССЫ С РАЗЛИЧНОЙ ДОЛЕЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ПРОЦЕССЕ МЕДЛЕННОГО ПИРОЛИЗА

Табакаев Роман Борисович¹,
TabakaevRB@tpu.ru

Астафьев Александр Владимирович¹,
ava31@tpu.ru

Ивашутенко Александр Сергеевич¹,
ivashutenko@tpu.ru

Языков Николай Алексеевич²,
yazykov@catalysis.ru

Заворин Александр Сергеевич¹,
zavorin@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения изменения теплофизических характеристик биомассы в процессе её термического преобразования применительно к проектированию технологического оборудования и энергетическому использованию.

Цель: изучение теплофизических характеристик биомассы с различной долей минерализации в процессе её медленного пиролиза.

Объекты: ресурсы биомассы, имеющие различную степень минерализации – солома ($A^d=2,8\%$), некондиционные пшеничные отруби ($A^d=6,9\%$), низинный торф Суховского месторождения ($A^d=22,8\%$).

Методы. Теплофизические характеристики образцов биомассы и их углеродистого остатка определены согласно аттестованным методикам (ГОСТ Р 54186-2010 (EN 14774-1: 2009), ГОСТ Р 56881-2016 (E1755-01), ГОСТ 11305-2013, 11306-2013, ГОСТ 32990-2014 (EN 15148: 2009); значения теплоты сгорания установлены при помощи калориметра АБК-1 (РЭТ, Россия) в соответствии с ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009); элементный анализ органической части определен на приборе Vario Micro Cube (Elementar, Германия); термическая переработка осуществлена методами дифференциального термического анализа и физического эксперимента; теплофизические характеристики биомассы и её углеродистого остатка измерены методом лазерной вспышки при помощи анализатора температуропроводности Discovery Laser Flash 1 (DLF-1); измерения истинной плотности выполнены с помощью автоматического газового пикнометра Ultrapyc-1200e (Quantachrome Instruments, США); структуру рассматриваемого углеродного остатка, полученного при пиролизе биомассы, исследовали методом сканирующей микроскопии на электронном микроскопе VEGA 3 SBU (TESCAN, Чехия).

Результаты. Пиролиз соломы и отрубей протекает в две стадии, различающиеся средней скоростью разложения – (0,38...0,41) % °C⁻¹ и 0,09 % °C⁻¹ соответственно. Разложение торфа протекает во всем температурном диапазоне 220–500 °C при среднем значении скорости разложения 0,11 % °C⁻¹. Теплопроводность углеродных остатков из соломы и отрубей, имеющих относительно невысокую для биомассы величину зольности, несущественно изменяется вплоть до 400 °C, после чего её значение возрастает. Теплоемкость этих образцов увеличивается с температурой их получения до 300 °C, после чего происходит её резкое снижение. Углеродистый остаток, полученный при 500 °C, имеет более высокое значение теплоемкости по сравнению с остатком при 400 °C. Отмеченные изменения можно объяснить разложением компонентов органической части биомассы – целлюлозы и лигнина. Теплоемкость и теплопроводность углеродного остатка из суховского торфа, имеющего высокую долю минерализации ($A^d=22,8\%$), снижаются во всем рассмотренном температурном диапазоне, что обусловлено повышением доли неорганических компонентов за счет разложения органической массы, что подтверждается ростом плотности твердой фазы.

Ключевые слова:

Биомасса, пиролиз, теплофизические характеристики, дифференциальный термический анализ, истинные значения.

Введение

В настоящее время многие страны нацелены на увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в топливно-энергетическом балансе. Это обусловлено стремлением снизить негативное воздействие энергетической отрасли на окружающую среду, обеспечить энергетическую независимость, получить возобновляемые топливные ресурсы [1–5].

Интенсивному развитию альтернативной энергетики способствует разработка государственных программ и введение «зеленых» тарифов. Как следствие, доля ВИЭ в мировом энергетическом балансе увеличивается с каждым годом [3–6]. По данным Международного энергетического агентства, в настоящее время доля выработки электроэнергии на ВИЭ составляет 11,3 % (без учета гидроэнергетики) [6].

Ключевыми факторами для внедрения ВИЭ являются географическое положение и климатическая зона региона [7–9]. Например, эффективность солнечных электростанций существенно зависит от продолжительности светового дня и плотности потока солнечной энергии в месте их расположения [10]. Геотермальная энергетика применима только в определенных географических местностях: регионы с высоким геотермическим градиентом и близким расположением геотермальных вод к поверхности [9, 11]. Целесообразность строительства ветряных электростанций определяется среднегодовой скоростью ветра на данной территории [8, 12]. В связи с этим в качестве наиболее универсального вида ВИЭ с точки зрения возможности повсеместного внедрения может рассматриваться биомасса.

Биомасса занимает четвертое место среди всех топливных ресурсов и лидирующее место среди ВИЭ по доле использования в энергетике [6, 13–15]. Исследования потенциала биоэнергетики [16] показывают, что ресурсы биомассы способны покрыть 35 % в глобальном топливно-энергетическом балансе. Необходимо отметить, что большая часть ресурсов биомассы представляет собой органические отходы различных отраслей (сельское хозяйство, животноводство, лесозаготовка и лесопереработка и др.). В связи с этим энергетическое использование биомассы одновременно решает вопрос утилизации отходов, способствуя улучшению экологической составляющей и сокращению площадей под свалки.

Одной из наиболее перспективных среди доступных технологий энергетического использования биомассы является пиролиз [17]. Опыт пиролизической переработки биомассы [18–20] показывает, что из её ресурсов могут быть получены ценные для энергетики и химической промышленности продукты – твердый углеродистый остаток, жидкие углеводороды (смолы) и горючий газ. При этом параметры переработки оказывают существенное влияние на выход конкретного продукта, его характеристики, назначение использования [21, 22]. В зависимости от скорости нагрева пиролиз можно подразделить на медленный (до 60 °C/мин), промежуточный (от 1 до 10 °C/с), быстрый (от 10 до 200 °C/с) и мгновенный (свыше 1000 °C/с) типы [23, 24].

В процессе пиролиза при разложении исходной биомассы происходит постепенное выделение летучих веществ с образованием углеродистого остатка, в котором по мере разложения изменяется содержание углерода. В результате меняются теплофизические характеристики углеродистого остатка: теплоемкость и теплопроводность, которые необходимы при математическом описании процессов разложения биомассы при пиролизе [25]. Более того, эти данные необходимы для оптимизации технологических параметров, понимания происходящих при этом процессов.

Исследования теплоемкости древесины или сельскохозяйственных видов биомассы встречаются в литературе [26–33], однако информация об изменении теплофизических характеристик их углеродистого остатка в процессе термической переработки встреча-

ется крайне редко. Известны работы по исследованию теплофизических характеристик углеродного остатка [25, 33], полученного при быстром пиролизе биомассы, авторы которых после принятия допущений и упрощений при описании процессов представляют изменение теплоемкости в виде линейной функции. Однако в процессе термической переработки биомассы разлагаются содержащиеся в ней органические соединения (гемицеллюлоза, целлюлоза, лигнин и др.), что влечет за собой изменение состава, структуры и характеристик углеродного остатка [34]. Эти изменения указывают на сложную (нелинейную) зависимость теплофизических характеристик от параметров процесса пиролиза.

Помимо органической составляющей на количество образующегося углеродного остатка биомассы влияет её минеральная часть. В работе [35] показано, что доля неорганической составляющей в биомассе может изменяться от 0,1 до 34,3 %. При этом минеральные компоненты биомассы практически не претерпевают изменений до температуры 515 °C, в то время как органическая часть может изменяться более чем на 60 % [36]. Таким образом, в процессе пиролиза биомассы её минеральная составляющая может стать преобладающей частью, свойства которой будут определять характеристики получаемого углеродного остатка.

В связи с вышеописанным целью настоящего исследования является изучение теплофизических характеристик биомассы с различной долей минерализации в процессе её медленного пиролиза.

Методика исследования

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассмотрены ресурсы биомассы, имеющие различную степень минерализации (табл. 1): солома имела зольность 2,8 %, некондиционные пшеничные отруби – 6,9 %, низинный торф Суховского месторождения – 22,8 %. Характеристики образцов изучены после достижения ими воздушно-сухого состояния. Влажность и зольность соломы и отрубей определяли согласно стандартам ГОСТ Р 54186-2010 (EN 14774-1: 2009) и ГОСТ Р 56881-2016 (E1755-01), для торфа использованы соответствующие данному виду топлива методики – ГОСТ 11305-2013 и ГОСТ 11306-2013. Выход летучих веществ для всех изучаемых образцов биомассы устанавливали согласно методике ГОСТ 32990-2014 (EN 15148: 2009), теплоту сгорания биомассы определяли при помощи калориметра АБК-1 (РЭТ, Россия) в соответствии с ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009). Элементный анализ органической части проводили на приборе Vario Micro Cube (Elementar, Германия).

Дифференциальный термический и гравиметрический анализы

Для исследования пиролиза биомассы проведен термогравиметрический анализ (ТГ) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) на синхронном термоанализаторе STA 449 F5 Jupiter

(Netzsch, Германия). Параметры проведения анализа включали: масса пробы составила 20 мг, скорость нагрева образцов – 10 °C/мин, температурный интер-

вал нагрева – 40–1000 °C. Анализы выполнены в инертной среде аргона (расход 20 мл в минуту) с целью имитации условий осуществления пиролиза.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики исследуемой биомассы [37]

Table 1. Thermotechnical characteristics of biomass [37]

Теплотехническая характеристика/Thermotechnical characteristics	солома/straw	отруби/bran	торф*/peat*
Влажность W^a , %/Humidity W^a , %	7,0	8,6	9,9
Зольность на сухую массу A^d , %/Ash content of dry matter A^d , %	2,8	6,9	22,8
Выход летучих веществ V^{daf} , %/Yield of volatile matter V^{daf} , %	78,5	81,0	74,8
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг/Net calorific value Q_i^r , MJ/kg	17,7	16,6	11,8
Элементный состав органической части (на сухую беззольную массу), % Ultimate analysis of organic matter (dry ash free basis), %			
C^{daf}	50,20	49,14	52,06
H^{daf}	6,36	6,66	6,31
N^{daf}	1,09	3,30	3,58
S^{daf}	следы	0,07	0,20
O^{daf}	42,35	40,83	37,85

Перед проведением экспериментов термоанализатор был откалиброван по входящим в состав его поставки стандартным образцам: индий (температура плавления 156,7 °C), олово (температура плавления 232,0 °C), висмут (температура плавления 271,5 °C), цинк (температура плавления 419,6 °C), алюминий (температура плавления 660,4 °C) и серебро (температура плавления 951,6 °C). Коррекция базовой линии ТГ выполнена по данным, полученным на пустом алундовом тигле (Al_2O_3).

Данные ТГ использованы для оптимизации параметров пиролиза, выбора температурного диапазона изучения свойств углеродных остатков.

Термическая переработка

Для проведения термической переработки рассматриваемых образцов изготовлена специальная лабораторная установка (рис. 1), состоящая из реактора – 1 с крышкой, нагревательного элемента – 2, защитного кожуха – 3 и К-типе термопары – 4 в комплекте с регистратором температуры ТМ5104 (Элемер, Россия). Внутренний диаметр реактора составляет 20 мм.

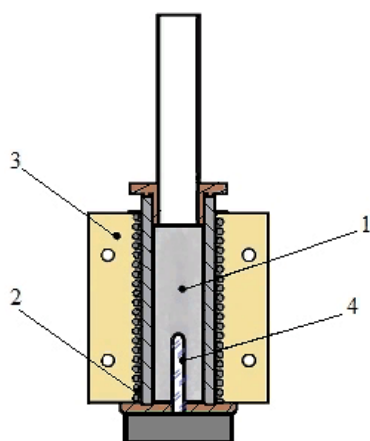


Рис. 1. Лабораторная установка термической переработки биомассы: 1) реактор; 2) нагревательный элемент; 3) защитный кожух; 4) термопара К-типе

Fig. 1. Laboratory unit for biomass thermal processing: 1) reactor; 2) heating element; 3) protective casing; 4) K-type thermocouple

Предварительно исходную биомассу измельчали на универсальной мельнице VLM-25 (Вилитек, Россия) до фракции 0,2...1,0 мм. Влажность полученной пробы измеряли на анализаторе Элвиз-2С (ЭЛИЗА, Россия). Измельченные пробы биомассы загружали в реактор, заполняя 80 % его объема. Осуществляли нагрев реактора со скоростью 10 °C в минуту. В процессе нагрева биомасса разлагалась, выделяя летучие продукты пиролиза (пары смолы и пирогенетической воды, газ). В связи с этим крышку реактора соединяли при помощи силиконового шланга со стеклянным холодильником для конденсации паров, газ выпускали в атмосферу.

Нагрев реактора осуществляли до температуры 200–500 °C (шаг 100 °C), после чего выдерживали при заданной температуре до полного визуального окончания выхода летучих продуктов. Реактор охлаждали до комнатной температуры естественным путем.

Теплотехнические характеристики углеродистого остатка

Влажность углеродистого остатка измеряли при помощи анализатора Элвиз-2С (ЭЛИЗА, Россия), зольность определяли по методикам, соответствующим типу исходного сырья: зольность соломы и отрубей устанавливали согласно ГОСТ Р 56881-2016 (Е1755-01), зольность торфа – согласно ГОСТ 11306-2013. Выход летучих веществ определяли согласно ГОСТ 32990-2014 (EN 15148: 2009). Низшую теплоту сгорания (Q_i^r) измеряли с помощью калориметра АБК-1, элементный состав – с помощью прибора Vario Micro Cube.

Теплофизические характеристики

Исследование теплоемкости и теплопроводности рассматриваемых проб биомассы и полученных при их пиролизе углеродистых остатков проведено на анализаторе температуропроводности Discovery Laser Flash 1 (DLF-1) с высокотемпературной приставкой EM-1200 (TA Instruments, США), принцип работы которого основан на методе лазерной вспышки. Преимуществом данного метода является высокая скорость измерения с хорошей точностью и воспроизводимостью.

Метод заключается в равномерном облучении одной плоскости дискообразного образца диаметром 12,5 мм и толщиной 1,5 мм (измерения осуществлены при помощи рычажного микрометра 02005 (ЛИЗ, Россия)) коротким импульсом энергии. Температурно-временная зависимость на нижней поверхности образца регистрируется твердотельным оптическим датчиком со сверхбыстрым откликом. На основе полученного значения температуропроводности и ранее измеренного значения плотности образца (табл. 2) рассчитывали теплоемкость и теплопроводность. Данный метод показал хорошую применимость для исследования теплопроводности и теплоемкости твердых органических топлив [38, 39].

Перед анализом отруби и их углеродистый остаток, полученный в диапазоне температур 200–500 °С, прессовали в гранулы в форме диска массой около 0,2 г при давлении 640 МПа. При гранулировании углеродистого остатка, полученного при 500 °С, прочный диск сформовать не удалось, по-видимому, из-за разрушения лигнина в его составе. Согласно [40] к данному углеродистому остатку в качестве связующего вещества добавлены отруби в количестве 4 % мас.

Таблица 2. Плотность спрессованных образцов

Table 2. Density of pressed samples

Биомасса Biomass	Плотность, кг/м ³ /Density, kg/m ³				
	Исходное сырье Feedstock	Углеродные остатки, полученные при температуре, °С Carbon residues obtained at temperature, °С			
		200	300	400	500
Солома/Straw	950,6	1051,5	866,3	828,7	714,2
Отруби/Bran	1155,9	1060,0	926,0	1039,5	741,7
Торф/Peat	1435,1	1378,4	1340,7	1391,9	1362,7

Измерение теплофизических характеристик проведено при температуре 100 °С для исключения влияния влажности на результаты анализа. В качестве эталона при анализе использовали стандартный образец (руtex 7740 Netzsch, sample N: NIB007152), поставленный в комплекте с прибором. Для каждого анализируемого образца изготавливали три гранулы, которые анализировали параллельно с эталоном. Измерение характеристик каждой гранулы осуществляли 5 раз.

Измерение плотности образцов твердой фазы вещества

Измерения истинной плотности выполнены с помощью автоматического газового пикнометра Ultraruc-1200e (Quantachrome Instruments, США), оснащенного ячейкой для измерения образцов малого объема (1 мл).

В качестве рабочего газа использован гелий. Перед измерением образец продувался рабочим газом в импульсном режиме. Измерения плотности проводили до достижения относительного линейного отклонения менее 1 % отн. среди трех последовательных повторов. Для уменьшения систематических погрешностей, связанных с измерением образцов малых объемов, измерения каждого образца выполняли 5 раз, после чего вычисляли средний истинный объем и среднюю истинную плотность образца.

Изучение структуры образцов

Структуру рассматриваемого углеродного остатка, полученного при пиролизе биомассы, исследовали методом сканирующей микроскопии на электронном микроскопе VEGA 3 SBU (TESCAN, Чехия). Перед началом анализа пробы предварительно измельчали в планетарной мельнице Pulverisette 6 (Fritsch, Германия) до пылевидного состояния (размер частиц ≤200 мкм).

Обсуждение результатов

На рис. 2 приведены данные дифференциального термического анализа исследуемых проб биомассы с различной степенью минерализации в диапазоне температуры 40–1000 °С. Видно, что термическое разложение биомассы начинается приблизительно при 220 °С. Активная стадия разложения соломы (0,41 % °С⁻¹) и отрубей (0,38 % °С⁻¹) протекает в температурном диапазоне 240–365 °С. При дальнейшем росте температуры до 500 °С наблюдается резкое снижение средней скорости потери массы до значения 0,09 % °С⁻¹, равной для обоих топлив. Разложение торфа протекает практически равномерно во всем температурном диапазоне 220–500 °С при среднем значении скорости разложения 0,11 % °С⁻¹. Окончание разложения для всех трех проб биомассы наблюдается при 500 °С.

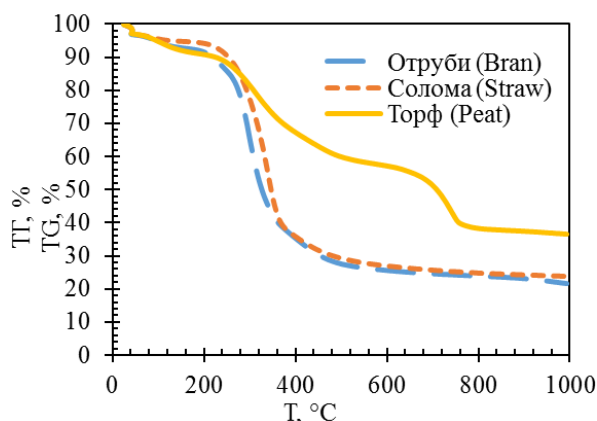


Рис. 2. Изменение массы образцов биомассы по данным дифференциального термического анализа

Fig. 2. TG-curves of biomass differential thermal analysis

Продолжающееся снижение массы у суховского торфа в температурном диапазоне 500–900 °С обусловлено разложением карбоната кальция, содержащегося в его минеральной части [41]. Согласно [42] термическое разложение карбоната кальция наблюдается при температурах 450–1000 °С.

Таким образом можно прийти к выводу, что для экономии удельных энергозатрат пиролиз биомассы необходимо проводить при температуре не выше 500 °С.

Методом лазерной вспышки определены коэффициенты теплопроводности биомассы в спрессованном состоянии: 0,22 Вт/(м·К) для отрубей, 0,17 Вт/(м·К) для соломы и 0,23 Вт/(м·К) для суховского торфа. Значения коэффициентов теплопроводности углерод-

ных остатков, полученных при медленном пиролизе биомассы в диапазоне температур 200–500 °С, представлены на рис. 3. Видно, что теплопроводность углеродных остатков из соломы и отрубей, имеющих относительно невысокую для биомассы величину зольности, несущественно изменяется вплоть до 400 °С, после чего её значение возрастает. Это может быть связано со структурными изменениями, происходящими при разложении лигнина, а также с добавлением 4 % отрубей при формировании спрессованного диска из углеродных остатков соломы и отрубей.

Теплопроводность углеродного остатка из суховского торфа снижается во всем рассмотренном температурном диапазоне. Это можно объяснить тем, что органическая часть топлива переходит в газообразную фазу, в результате чего зольность углеродного остатка возрастает. Поскольку, согласно [41], большая часть минеральной составляющей топлива представлена карбонатом кальция, имеющим довольно низкое значение коэффициента теплопроводности [43], коэффициент теплопроводности углеродного остатка закономерно снижается.

Литературные данные по изучению коэффициента теплопроводности углеродных остатков, полученных пиролизом биомассы, представлены довольно широким диапазоном – от 0,0027 до 0,95 Вт/(м·К) [44, 45]. При этом полученные в настоящем исследовании значения попадают в данный диапазон.

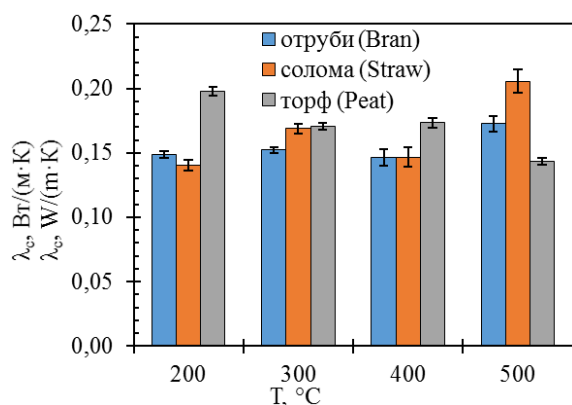


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности углеродистого остатка (λ_c) от температуры его получения

Fig. 3. Dependence of the carbon residue thermal conductivity coefficient (λ_c) on its production temperature

Теплоемкость исходной биомассы в спрессованном состоянии составила 2300 Дж/(кг·К) для отрубей, 2350 Дж/(кг·К) для соломы и 1450 Дж/(кг·К) для суховского торфа. Изменение теплоемкости углеродных остатков в зависимости от температуры их получения представлено на рис. 4.

Теплоемкость углеродных остатков из соломы и отрубей увеличивается до температуры их получения, равной 300 °С, после чего происходит её резкое снижение. Это может быть связано с протекающим при данных температурах разложением целлюлозы, содержащейся в составе данных видов биомассы. Про-

исходящие процессы приводят к изменению поверхности биомассы, что продемонстрировано на рис. 5 на примере углеродных остатков из отрубей: в процессе нагрева с 300 до 400 °С существенно увеличилась пористость поверхности углеродного остатка. Кроме того, при температуре переработки свыше 300 °С увеличивается плотность твердой фазы углеродных остатков из соломы и отрубей (рис. 6). Углеродистый остаток, полученный при 500 °С, имеет более высокое значение теплоемкости по сравнению с остатком при 400 °С, что можно связать с разложением лигнина в составе образцов биомассы.

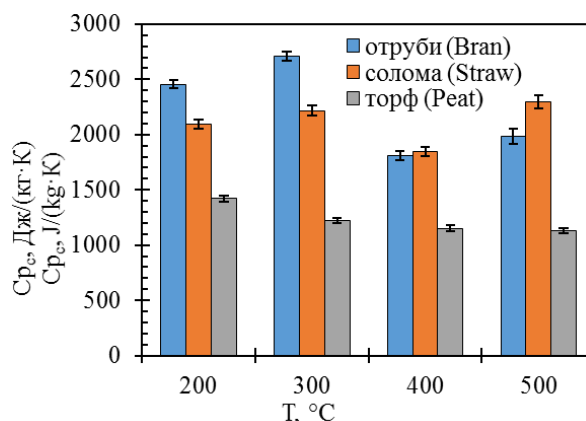


Рис. 4. Зависимость теплоемкости углеродного остатка (C_{pc}) от температуры его получения

Fig. 4. Dependence of the carbon residue heat capacity (C_{pc}) on its production temperature

Теплоемкость углеродистого остатка из суховского торфа аналогично рассмотренному ранее коэффициенту теплопроводности снижается с ростом температуры переработки. Эту закономерность также можно объяснить повышением доли минерализации за счет разложения органической массы, что подтверждается ростом плотности твердой фазы (рис. 6).

При сравнении полученных результатов и данных других авторов по изучению теплофизических характеристик углеродистых остатков биомассы [25, 33, 46], полученных в условия быстрого пиролиза, можно заметить, что установленные в настоящей работе значения теплоемкости углеродного остатка биомассы имеют более высокие значения. Это можно объяснить тем, что в данных работах углеродные остатки получены быстрым способом пиролиза биомассы, обеспечивающим иную от медленного типа структуру поверхности и, соответственно, свойства твердого остатка.

Как известно [47, 48], теплопроводность вещества можно представить как сумму теплопроводности составляющих его компонентов с учетом их доли:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n (\lambda_i)_i \omega_i, \quad (1)$$

где λ_i – истинная теплопроводность i -го компонента вещества, Дж/(кг·К); ω_i – доля i -го компонента в веществе.

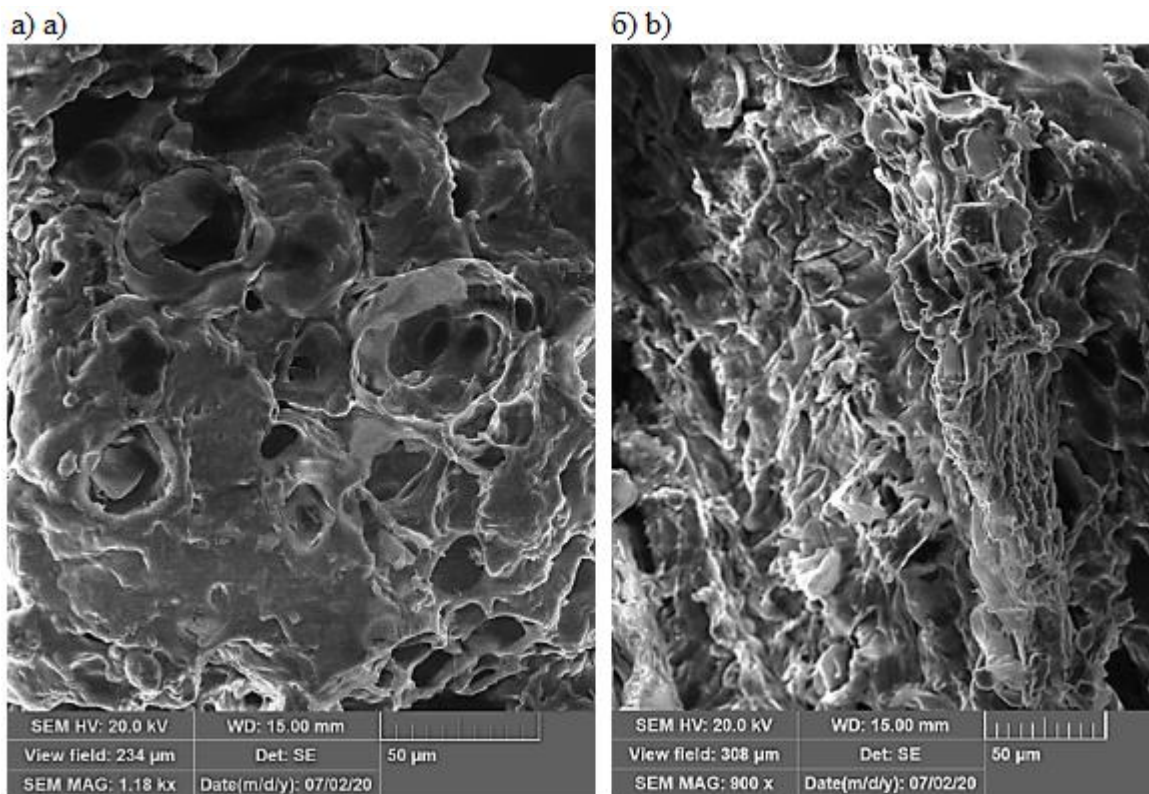


Рис. 5. СЭМ-изображения углеродных остатков, полученных при различных температурах: а) 300 °С; б) 400 °С
 Fig. 5. SEM images of carbon residue obtained at different temperatures: a) 300 °C; b) 400 °C

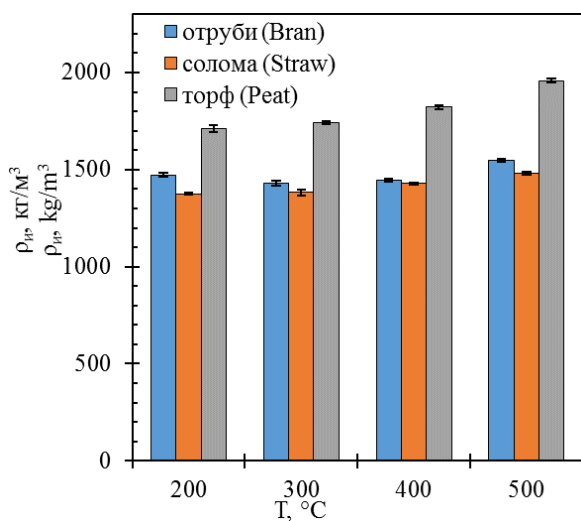


Рис. 6. Значения истинной плотности биомассы и углеродных остатков (ρ_p), полученных при её пиролизе в температурном интервале 200–500 °С

Fig. 6. Values of true density (ρ_p) for biomass and carbon residue obtained during its pyrolysis in the temperature range of 200–500 °C

Этот подход можно применить и к теплоемкости вещества:

$$C_p = \sum_{i=1}^n (C_{p,t})_i \omega_i, \quad (2)$$

где $C_{s,t}$ – истинная теплоемкость i -го компонента вещества, Вт/(м·К); ω_i – доля i -го компонента в веществе.

Биомассу и её углеродные остатки упрощенно можно представить как систему, наполненную твердой фазой и воздухом. В таком случае их плотность можно записать:

$$\rho = \rho_{s,t} \omega_s + \rho_{air} \omega_{air}, \quad (3)$$

где $\rho_{s,t}$ – истинная плотность биомассы или её углеродного остатка, кг/м³; ω_s – доля твердой фазы вещества в анализируемом образце; ρ_{air} – плотность воздуха при 100 °С (температура определения теплофизических характеристик), равная 0,9461 кг/м³ [49]; ω_{air} – доля воздуха в анализируемом образце.

Принимается, что сумма ω_s и ω_{air} равняется единице. С учетом этого, преобразовав уравнение (3), можно определить долю твердой фазы (ω_s) в образце:

$$\omega_s = \frac{\rho - \rho_{air}}{\rho_{s,t} - \rho_{air}}. \quad (4)$$

Выражения (1)–(4) позволяют определить истинные значения теплофизических характеристик для рассматриваемых видов биомассы (рис. 7). Можно заметить, что истинные значения выше значений, определенных для спрессованного состояния образцов. Однако изменения истинных характеристик повторяют характер зависимостей для спрессованного состояния.

Полученные данные с использованием формул (1)–(4) позволяют рассчитывать теплофизические характеристики (теплоемкость и коэффициент теплопроводности) образцов соломы, отрубей и суховоского торфа при любой насыпной плотности.

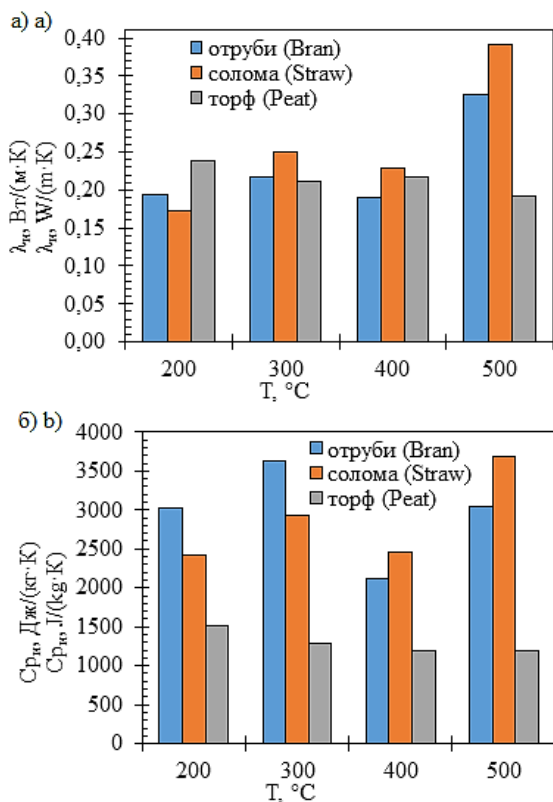


Рис. 7. Истинные значения теплоемкости ($C_{p,w}$) и коэффициента теплопроводности (λ_w) для биомассы и углеродных остатков, полученных при её пиролизе в температурном интервале 200–500 °C

Fig. 7. True values of thermal conductivity coefficient (λ_w) and heat capacity ($C_{p,w}$) for biomass and carbon residue obtained during its pyrolysis in the temperature range of 200–500 °C

Заключение

Пиролиз соломы, отрубей и суховского торфа протекает при температуре 220–500 °C. При этом разложение соломы и отрубей происходит в две стадии, различающиеся средней скоростью разложения – (0,38...0,41) % °C⁻¹ и 0,09 % °C⁻¹ соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Pazheri F.R., Othman M.F., Malik N.H. A review on global renewable electricity scenario // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 31. – P. 835–845.
- Towards carbon free economy and electricity: the puzzle of energy costs, sustainability and security based on willingness to pay / T. Balezantis, D. Streimikiene, I. Mikalauskas, Z. Shen // *Energy*. – 2021. – V. 214. – Article number 119081.
- Doepfert M., Castro R. Techno-economic optimization of a 100 % renewable energy system in 2050 for countries with high shares of hydropower: the case of Portugal // *Renewable Energy*. – 2021. – V. 125. – P. 491–503.
- Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects, and their enabling technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 39. – P. 748–764.
- Pursiheimo E., Holttinen E., Koljonen T. Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system // *Renewable Energy*. – 2019. – V. 136. – P. 1119–1129.
- Key world energy statistics. – Paris: International Energy Agency, 2018. – 51 p.

Разложение торфа протекает во всем температурном диапазоне 220–500 °C при среднем значении скорости разложения 0,11 % °C⁻¹.

Методом лазерной вспышки определены теплофизические характеристики (теплоемкость и теплопроводность) исходной биомассы и её углеродных остатков, полученных при медленном пиролизе. Установлено, что теплопроводность углеродных остатков из соломы и отрубей, имеющих относительно невысокую для биомассы величину зольности, несущественно изменяется вплоть до 400 °C, после чего её значение возрастает. Теплоемкость этих образцов увеличивается до температуры их получения, равной 300 °C, после чего происходит её резкое снижение. Углеродистый остаток, полученный при 500 °C, имеет более высокое значение теплоемкости по сравнению с остатком при 400 °C. Отмеченные изменения можно объяснить разложением компонентов органической части биомассы – целлюлозы и лигнина.

Теплоемкость и теплопроводность углеродного остатка из суховского торфа, имеющего высокую долю минерализации ($A^d=22,8$ %), снижаются во всем рассмотренном температурном диапазоне, что обусловлено повышением доли неорганических компонентов за счет разложения органической массы, что подтверждается ростом плотности твердой фазы

Полученные данные позволяют рассчитывать теплофизические характеристики (теплоемкость и коэффициент теплопроводности) образцов соломы, отрубей или суховского торфа при любой насыпной плотности.

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда (проект № 19-79-00085). Изучение термического разложения осуществлено в рамках реализации проекта РФФИ № 20-38-90180 (аспиранты). Истинная плотность определена на приборной базе ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук» в рамках государственного задания (проект № АААА-А21-121011390007-7).

- Безруких П.П., Карабанов С.М. Эффективность возобновляемой энергетики. Мифы и факты // *Энергия: экономика, техника, экология*. – 2016. – № 6. – С. 11–24.
- Фортов В.Е., Попель О.С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 6. – С. 4–13.
- Pick J.B. Renewable energy: problems and prospects in Coachella Valley, California. – Cham: SpringerBriefs in Geography, 2017. – 210 p.
- Распределение ресурсов энергии солнечного излучения по территории России / О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева, Ю.Г. Коломиец, Е.Н. Терехова // *Энергия: экономика, техника, экология*. – 2007. – № 1. – С. 15–23.
- Barbier E. Geothermal energy technology and current status: an overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2002. – V. 6. – P. 3–65.
- A review on the forecasting of wind speed and generated power / M. Lei, L. Shiyan, J. Chuanwen, L. Hongling, Z. Yan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. – V. 13. – P. 915–920.
- Goldemberg J., Teixeira S. Coelho Renewable energy – traditional biomass vs. modern biomass // *Energy Policy*. – 2004. – V. 32. – P. 711–714.
- Edenhofer O. The IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. – New York: Cambridge

- University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011. – 1076 p.
15. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass // *Bioresource Technology*. – 2002. – V. 83 (1). – P. 37–46.
 16. Searle S., Malins C. A reassessment of global bioenergy potential in 2050 // *GCB Bioenergy*. – 2015. – V. 7. – P. 328–336.
 17. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами». – М.: Бюро НДТ, 2020. – 200 с.
 18. Thermal enrichment of different types of biomass by lowtemperature pyrolysis / R. Tabakaev, I. Kanipa, A. Astafev, Y. Dubinin, N. Yazykov, A. Zavorin, V. Yakovlev // *Fuel*. – 2019. – V. 245. – P. 29–38.
 19. Utilization of wheat bran for producing activated carbon with high specific surface area via NaOH activation using industrial furnace / Y. Zhang, X. Song, Y. Xu, H. Shen, X. Kong, H. Xu // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – V. 210. – P. 366–375.
 20. Microalgal biomass pretreatment for integrated processing into biofuels, food, and feed / J.C. de Carvalho, A.I. Magalhães Jr., G.V. de Melo Pereira, A.B.P. Medeiros, E.B. Sydney, C. Rodrigues, D.T.M. Aulestia, L.P. de Souza Vandenberghe, V.T. Soccol, C.R. Soccol // *Bioresource Technology*. – 2020. – V. 300. – Article number 122719.
 21. Богданов Н.Н. Полукоксование и газификация торфа. – М.: Государственное энергетическое изд-во, 1947. – 268 с.
 22. Федосеев С.Д., Чернышев А.Б. Полукоксование и газификация твердого топлива. – Москва: ГНТИ нефтяной и горнотопливной литературы, 1960. – 328 с.
 23. De Wild P., Reith H., Heeres E. Biomass pyrolysis for chemicals // *Biofuels*. – 2011. – V. 2. – P. 185–208.
 24. Pyrolysis of microalgae for fuel production: microalgae-based biofuels and bioproducts / J. Feroso, J.M. Coronado, D.P. Serrano, P. Pizarro. – Kidlington: Woodhead Publ., 2017. – 562 p.
 25. Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues // C. Dupont, R. Chiriac, G. Gauthier, F. Toche // *Fuel*. – 2014. – V. 115. – P. 644–651.
 26. Simpson W., TenWolde A. Wood handbook – wood as an engineering material. – Madison: Forest Products Laboratory, 1999. – 486 p.
 27. Sonderegger W., Hering S., Niemz P. Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions // *Holzforschung*. – 2011. – V. 65 – P. 369–375.
 28. Kiiskinen H.T., Lytykäinen K., Hämäläinen J.P. Specific heats of dry Scandinavian wood pulps // *Journal of pulp and paper science*. – 1998. – V. 24. – P. 219–223.
 29. Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells / V.S.P. Bitra, S. Banu, P. Ramakrishna, G. Narender, A.R. Womac // *Biosystems Engineering*. – 2010. – V. 106. – P. 503–512.
 30. Njie D.N., Rumsey T.R., Singh R.P. Thermal properties of cassava, yam and plantain // *Journal of Food Engineering*. – 1998. – V. 37. – P. 63–76.
 31. Singh K.K., Goswami T.K. Thermal properties of cumin seed // *Journal of Food Engineering*. – 2000. – V. 45. – P. 181–187.
 32. Mothée C.G., De Miranda I.C. Characterisation of sugarcane and coconut fibers by thermal analysis and FTIR // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2009. – V. 97. – P. 661–665.
 33. Gupta M., Yang J., Roy C. Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles // *Fuel*. – 2003. – V. 82. – P. 919–927.
 34. Кузнецов Б.Н. Каталитическая химия растительной биомассы // *Соросовский образовательный журнал*. – 1996. – № 12. – С. 47–55.
 35. Vassilev S.V., Vassileva C.G., Vassilev V.S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview // *Fuel*. – 2015. – V. 158. – P. 330–350.
 36. Kozlov A.N., Svishchev D.A. Transformation of the mineral matter of fuel wood in thermochemical conversion processes // *Solid Fuel Chemistry* – 2016. – V. 50. – P. 226–231.
 37. Кинетические характеристики пиролиза биомассы / Р.Б. Табакеев, Д.Б. Алтынбаева, К.Т. Ибраева, А.С. Заворин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 117–130.
 38. Kosowska-Golachowska M., Gajewski W., Musiał T. Determination of the effective thermal conductivity of solid fuels by the laser flash method // *Archives of Thermodynamics*. – 2014. – V. 35. – P. 3–16.
 39. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental and numerical study of coal dust ignition by a hot particle // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – V. 133. – P. 774–784.
 40. Способ получения формованного топлива: пат. Рос. Федерация № 2738709, заявл. 25.05.2020; опубл. 15.12.2020. Бюл. № 35.
 41. Исследование характеристик и минерального состава торфа Томской области применительно к энергетическому использованию / К.Т. Ибраева, Ю.О. Манаев, Р.Б. Табакеев, Н.А. Языков, А.С. Заворин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 191–200.
 42. Капаев Г.И. Физико-химические основы процесса термического разложения солей угольной кислоты: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – М., 2009. – 20 с.
 43. Гамер П.Н. Очистка воды для промышленных предприятий. – М.: Стройиздат, 1968. – 415 с.
 44. Modelling of the pyrolysis of biomass particles. Studies on kinetics, thermal and heat transfer effects / C.A. Koufopoulos, N. Papayannakos, G. Maschio, A. Lucchesi // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 1991. – V. 69. – P. 907–915.
 45. Kantorovich I.I., Bar-Ziv E. Heat transfer within highly porous chars: a review // *Fuel*. – 1999. – V. 78 (3). – P. 279–299.
 46. Raznjevic K. Handbook of thermodynamic tables and charts. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1976. – 392 p.
 47. Субботин А.Н. Теплоперенос при зажигании и горении структурно неоднородных сред: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Томск, 2011. – 307 с.
 48. Dul'nev G.N., Volkov D.P., Malarev V.I. Thermal conductivity of moist porous materials // *Journal of engineering physics*. – 1989. – V. 56. – P. 198–206.
 49. Tsilingiris P.T. Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100 °C // *Energy Conversion and Management*. – 2008. – V. 49. – P. 1098–1110.

Поступила 24.02.2021 г.

Информация об авторах

Табакеев Р.Б., кандидат технических наук, научный сотрудник Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Астафьев А.В., инженер организационного отдела Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ивашутенко А.С., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Языков Н.А., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории каталитических процессов переработки возобновляемого сырья Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

Заворин А.С., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой-руководитель Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова на правах кафедры Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 662.715.3

CHANGES IN THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF BIOMASS WITH DIFFERENT MINERALIZATION AMOUNT DURING ITS SLOW PYROLYSIS

Roman B. Tabakaev¹,
tabakaevRB@tpu.ru

Alexander V. Astafev¹,
ava31@tpu.ru

Alexander S. Ivashutenko¹,
ivashutenko@tpu.ru

Nikolay A. Yazykov²,
yazykov@catalysis.ru

Alexander S. Zavorin¹,
zavorin@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Borekov Institute of Catalysis SB RAS,
5, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The work relevance is caused by the need to study the changes of biomass thermophysical characteristics in its thermal transformation in relation to the design of technological equipment and energy use.

The main aim of the research is to study the thermophysical characteristics during slow pyrolysis of biomass with different mineralization amount.

Objects: biomass resources with different amount of mineralization – straw ($A^d=2,8\%$), nonconforming wheat bran ($A^d=6,9\%$), lowland peat of the Sukhovskiy deposit ($A^d=22,8\%$).

Methods. Thermotechnical characteristics of biomass samples and their carbon residue are determined according to certified methods (GOST R 54186-2010 (EN 14774-1: 2009), GOST R 56881-2016 (E1755-01), GOST 11305-2013, 11306-2013, GOST 32990-2014 (EN 15148: 2009)); values of the calorific value were determined using the ABK-1 calorimeter (RET, Russia) in accordance with GOST 147-2013 (ISO 1928-2009); elemental analysis of organic part was carried out on a Vario Micro Cube (Elementar, Germany) device; thermal processing was carried out by differential thermal analysis and physical experiment; the thermophysical characteristics of the biomass and its carbon residue were measured by laser flash method using the thermal conductivity analyzer Discovery Laser Flash 1 (DLF-1); the true density was measured using an automatic gas pycnometer Ultrapyc-1200e (Quantachrome Instruments, USA); the carbon residue structure was studied by scanning microscopy VEGA 3 SBU electron microscope (TESCAN, Czech Republic).

Results. Straw and bran pyrolysis proceeds in two stages, differing in the average rate of decomposition – $(0,38...0,41)\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ and $0,09\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ respectively. Peat decomposition occurs in the whole temperature range (220–500 °C) with an average decomposition rate of $0,11\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. It was found that the thermal conductivity of carbon residue from straw and bran, which have a relatively low ash content for biomass, does not significantly change up to 400 °C, after which this value increases. The heat capacity of these samples increases with the temperature of their production to 300 °C, after which it sharply decreases. The carbon residue obtained at 500 °C has a higher heat capacity value compared to the residue obtained at 400 °C. These changes can be explained by decomposition of biomass organic part components – cellulose and lignin. The heat capacity and the thermal conductivity of sukhovskiy peat carbon balance have a high mineralization amount ($A^d=22,8\%$), decrease in all temperature range, due to the inorganic components share increase in result of organic part decomposition, which is confirmed by the solid phase density increase.

Key words:

Biomass, pyrolysis, thermophysical characteristics, differential thermal analysis, true values.

The research was carried out at support of the Russian Science Foundation (project no. 19-79-00085). The thermal decomposition study was carried out within the framework of the RFBR project no. 20-38-90180 (postgraduate students). The true density was determined on the instrument base of the Federal Publicly Funded Institution of Science «Borekov Institute of Catalysis SB RAS» within the framework of the state task (project no. AAAA21-121011390007-7).

REFERENCES

1. Pazheri F.R., Othman M.F., Malik N.H. A review on global renewable electricity scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 31, pp. 835–845.
2. Balezantis T., Streimikiene D., Mikalauskas I., Shen Z. Towards carbon free economy and electricity: The puzzle of energy costs, sustainability and security based on willingness to pay. *Energy*, 2021, vol. 214, article number 119081.
3. Doepfert M., Castro R. Techno-economic optimization of a 100 % renewable energy system in 2050 for countries with high shares of hydropower: The case of Portugal. *Renewable Energy*, 2021, vol. 125, pp. 491–503.
4. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects, and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 748–764.

5. Pursiheimo E., Holttinen H., Koljonen T. Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system. *Renewable Energy*, 2019, vol. 136, pp. 1119–1129.
6. *Key world energy statistics*. Paris, International Energy Agency, 2018. 51 p.
7. Bezrukikh P.P., Karabanov S.M. Renewable energy efficiency. Myths and facts. *Energy: economics, technology, ecology*, 2016, no. 6, pp. 11–24. In Rus.
8. Fortov V.E., Popel O.S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 2014, no. 6, pp. 4–13. In Rus.
9. Pick J.B. *Renewable energy: problems and prospects in Coachella Valley, California*. Cham, SpringerBriefs in Geography, 2017. 210 p.
10. Popel O.S., Frid S.E., Kiseleva S.V., Kolomiets Yu.G., Terekhova E.N. Distribution of energy resources of solar radiation on the territory of Russia. *Energy: economics, technology, ecology*, 2007, no. 1, pp. 15–23. In Rus.
11. Barbier E. Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, vol. 6, pp. 3–65.
12. Lei M., Shiyang L., Chuanwen J., Hongling L., Yan Z. A review on the forecasting of wind speed and generated power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, pp. 915–920.
13. Goldemberg J., Teixeira Coelho S. Renewable energy – traditional biomass vs. modern biomass. *Energy Policy*, 2004, vol. 32, pp. 711–714.
14. Edenhofer O. *The IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. New York, Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011. 1076 p.
15. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 2002, vol. 83 (1), pp. 37–46.
16. Searle S., Malins C. A reassessment of global bioenergy potential in 2050. *GCB Bioenergy*, 2015, vol. 7, pp. 328–336.
17. *Informatsionno-tekhnicheskiiy spravochnik po nailuchshim dostupnyim tekhnologiyam «Utilizatsiya i obezvrezhivanie otkhodov termicheskimi sposobami»* [Information and technical guide to the best available technologies «Waste utilization and neutralization by thermal methods»]. Moscow, Bureau of NTD Publ., 2020. 200 p.
18. Tabakaev R., Kanipa I., Astafev A., Dubinin Y., Yazykov N., Zavorin A., Yakovlev V. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis. *Fuel*, 2019, vol. 245, pp. 29–38.
19. Zhang Y., Song X., Xu Y., Shen H., Kong X., Xu H. Utilization of wheat bran for producing. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 210, pp. 366–375.
20. De Carvalho J.C., Magalhães Jr. A.I., De Melo Pereira G.V., Medeiros A.B.P., Sydney E.B., Rodrigues C., Aulestia D.T.M., De Souza Vandenberghe L.P., Socol V.T., Socol C.R. Microalgal biomass pretreatment for integrated processing into biofuels, food, and feed. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 300, article number 122719.
21. Bogdanov N.N. *Polukoksovanie i gazifikatsiya torfa* [Semi-coking and gasification of peat]. Moscow, State energy Publ. house, 1947. 268 p.
22. Fedoseev S.D., Chernyshev A.B. *Polukoksovanie i gazifikatsiya tverdogo topliva* [Semi-coking and gasification of solid fuels]. Moscow, GNTI Oil and Mining and Fuel Literature, 1960. 328 p.
23. De Wild P., Reith H., Heeres E., Biomass pyrolysis for chemicals. *Biofuels*, 2011, vol. 2, pp. 185–208.
24. Feroso J., Coronado J.M., Serrano D.P., Pizarro P. *Pyrolysis of microalgae for fuel production: Microalgae-based biofuels and bioproducts*. Kidlington, Woodhead Publ., 2017. 562 p.
25. Dupont C., Chiriac R., Gauthier G., Toche F. Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues. *Fuel*, 2014, vol. 115, pp. 644–651.
26. Simpson W., TenWolde A. *Wood handbook – wood as an engineering material*. Madison, Forest Products Laboratory, 1999. 486 p.
27. Sonderegger W., Hering S., Niemz P. Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions. *Holzforschung*, 2011, vol. 65, pp. 369–375.
28. Kiiskinen H.T., Lyytikäinen K., Hämäläinen J.P. Specific heats of dry Scandinavian wood pulps. *Journal of pulp and paper science*, 1998, vol. 24, pp. 219–223.
29. Bitra V.S.P., Banu S., Ramakrishna P., Narender G., Womac A.R. Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells. *Biosystems Engineering*, 2010, vol. 106, pp. 503–512.
30. Njie D.N., Rumsey T.R., Singh R.P. Thermal properties of cassava, yam and plantain. *Journal of Food Engineering*, 1998, vol. 37, pp. 63–76.
31. Singh K.K., Goswami T.K. Thermal properties of cumin seed. *Journal of Food Engineering*, 2000, vol. 45, pp. 181–187.
32. Mothée C.G., De Miranda I.C. Characterisation of sugarcane and coconut fibers by thermal analysis and FTIR. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2009, vol. 97, pp. 661–665.
33. Gupta M., Yang J., Roy C. Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles. *Fuel*, 2003, vol. 82, pp. 919–927.
34. Kuznetsov B.N. Kataliticheskaya khimiya rastitelnoy biomassy [Catalytic chemistry of plant biomass]. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1996, no. 12, pp. 47–55.
35. Vassilev S.V., Vassileva C.G., Vassilev V.S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview. *Fuel*, 2015, vol. 158, pp. 330–350.
36. Kozlov A.N., Svishchev D.A. Transformation of the mineral matter of fuel wood in thermochemical conversion processes. *Solid Fuel Chemistry*, 2016, vol. 50, pp. 226–231.
37. Tabakaev R.B., Altyntbaeva D.B., Ibraeva K.T., Zavorin A.S. Kinetic characteristics of biomass pyrolysis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 117–130. In Rus.
38. Kosowska-Golachowska M., Gajewski W., Musiał T. Determination of the effective thermal conductivity of solid fuels by the laser flash method. *Archives of Thermodynamics*, 2014, vol. 35, pp. 3–16.
39. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental and numerical study of coal dust ignition by a hot particle. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 133, pp. 774–784.
40. Tabakaev R.B., Kan V.V., Skugarova A.O. *Sposob polucheniya formovochnogo topliva* [Method for producing formed fuel]. Patent RF, no. 2738709, 2020.
41. Ibraeva K.T., Manaev U.O., Tabakaev R.B., Yazikov N.A., Zavorin A.S. Research of characteristics and mineral composition of peat of the Tomsk region relating to energy use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 191–200. In Rus.
42. Kapaev G.I. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessa termicheskogo razlozheniya soley ugolnoy kisloty*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Physicochemical basis of thermal decomposition of carbonic acid salts. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2009. 20 p.
43. Gamer P.I. *Ochistka vody dlya promyshlennykh predpriyatiy* [Water treatment for industrial enterprises]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968. 415 p.
44. Koufopoulos C.A., Papayannakos N., Maschio G., Lucchesi A. Modelling of the pyrolysis of biomass particles. Studies on kinetics, thermal and heat transfer effects. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1991, vol. 69, pp. 907–915.
45. Kantorovich I.I., Bar-Ziv E. Heat transfer within highly porous chars: a review. *Fuel*, 1999, vol. 78 (3), pp. 279–299.
46. Raznjevic K. *Handbook of thermodynamic tables and charts*. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1976. 392 p.
47. Subbotin A.N. *Teplomassoperenos pri zazhiganii i gorenii strukturno neodnorodnykh sred* Di. Dok nauk [Heat and mass transfer during ignition and combustion of structurally inhomogeneous media. Dr. Diss.]. Tomsk, 2011. 307 p.
48. Dulnev G.N., Volkov D.P., Malarev V.I. Thermal conductivity of moist porous materials. *Journal of engineering physics*, 1989, vol. 56, pp. 198–206.
49. Tsilingiris P.T. Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100 °C. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 1098–1110.

Received: 24 February 2021.

Information about the authors

Roman B. Tabakaev, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander V. Astafev, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Ivashutenko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay A. Yazykov, Cand. Sc., researcher, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS.

Alexander S. Zavorin, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.