

Е.В. ХРАМЦОВ, студент гр. ФЭ24-026 (СФУ)
Научный руководитель А.В. ЖУЙКОВ, к.т.н., доцент (СФУ)
г. Красноярск

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И КАРБОНИЗАТЫ

При производстве тепловой энергии на угольных тепловых электростанциях и котельных в атмосферу выбрасывается значительное количество диоксида углерода (CO_2). Это представляет собой глобальную экологическую проблему, поскольку уголь остается основным энергетическим топливом во многих регионах мира. На этапе перехода к низкоуглеродным технологиям частичное сокращение выбросов CO_2 в постепенной перспективе может быть достигнуто за счёт совместного сжигания угля с биомассой [1].

Ряд научных исследований уже провёл практическую апробацию, подтвердив не только снижение количества парниковых газов, но и уменьшение количества мелкодисперсных зольных частиц в дымовых газах. Включение биомассы в топливную смесь позволяет улучшить энергетические, экологические и бытовые показатели процесса сжигания [2].

Эффект сокращения выбросов CO_2 при совместном сжигании угля и биомассы приводит к тому, что в процессе роста биомассы вбирается из атмосферы столько же углекислого газа, сколько выделяется при ее сгорании. Таким образом, использование биомассы в топливной смеси приводит к снижению общего объема CO_2 по сравнению с полным сжиганием угля [3].

Ключевые преимущества биомассы как энергетического ресурса по сравнению с ископаемыми твёрдыми видами топлива включают: количество отходов различных отраслях промышленности и сельского хозяйства; зависимость стоимости от расстояния до объекта генерации тепловой энергии; меньшее образование вредных газообразных отходов при сжигании; принадлежность к возобновляемым источникам энергии.

Вместе с тем использование биомассы имеет ряд недостатков, таких как: высокая гигроскопичность, приводящая к быстрому впитыванию влаги при хранении и транспортировке, что приводит к снижению теплотворной способности у ухудшению характеристик ее горения; большое разнообразие форм и размеров топливных частиц, снижающие ее сыпучие и размолоспособные свойства; повышенная склонность к тлению

**VIII Международная молодежная научно-практическая
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**
21-22 ноября 2025 г.

124-2

и самовозгоранию; ограниченные запасы по сравнению с ископаемыми видами топлива; необходимость дополнительного измельчения перед подачей в топку [4, 5]. Несмотря на перечисленные недостатки, биомасса остается одним из наиболее перспективных возобновляемых энергоресурсов для частичной замены угля в отрасли теплоэнергетике.

Цель данного исследования заключалась в исследовании теплотехнических свойств и определения характеристик горения различных видов отходов производства. В качестве объектов исследования были рассмотрены следующие виды отходов:

1. буроугольный карбонизат (БК), полученный на опытно-промышленной установке из балахтинского угля;
2. коксозольный остаток (КЗО, полученный на предприятии по изготовлению бумаги использующее в своем производстве генераторный газ получаемый в процессе газификации балахтинского угля;
3. бумажные отходы на основе картона (ТКО);
4. сосновые опилки (ОП);
5. иловые осадки сточных вод, отходы городских очистных сооружений (ОСВ).

Для сравнения свойств этих топлив были рассмотрены следующие энергетические угли:

6. бородинский бурый уголь (2Б), Канско-Ачинский угольный бассейн (Красноярский край);
7. балахтинский уголь (3Б), Канско-Ачинский угольный бассейн (Красноярский край);
8. каа-хемский каменный уголь марки ГЖ (КХ), Улуг-Хемский угольный бассейн (республика Тыва);
9. чаданский каменный уголь марки ГЖ (ЧД), Улуг-Хемский угольный бассейн (республика Тыва);
10. изыхский каменный уголь марки Д (ИЗ), Минусинский угольный бассейн (Республика Хакасия);
11. черногорский каменный уголь марки Д (ЧР), Минусинский угольный бассейн (Республика Хакасия).

Технический и элементный анализ всех исследуемых топлив был проведен в соответствии с ГОСТ и представлен в таблице 1.

Для углей и карбонизатов характерно высокое содержание углерода от 60 до 93%, а для биомассы содержание углерода составляет не более 60%, но у биомассы большое количество летучих веществ, которое может достигать более 80%.

Для определения основных характеристик горения был использован метод термического анализа проведенный в окислительной среде. По профилям кривых термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной-термогравиметрии (ДТГ) были определены основные характеристики

горения топлив. Одной из характеристик горения является индекс горения, который показывает на сколько топливо хорошо горит и вычисляется по формуле [6]:

$$S = \frac{R_{\max} \cdot R_{\text{mean}}}{T_i^2 \cdot T_b} \times 10^6 \quad [\text{мин}^{-2} \circ\text{C}^{-3}] \quad (1)$$

где T_i и T_b – температуры при которых происходит воспламенение и выгорание коксового остатка, $\circ\text{C}$; R_{\max} – максимальная скорость убыли массы (или максимальная скорость горения), $\%/\text{мин}$; R_{mean} – средняя скорость убыли массы от T_i до T_b , $\%/\text{мин}$.

Таблица 1
Результаты технического и элементного анализа топлив

Топлива	W^a	A^d	V^{daf}	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}	$Q_s^{\text{daf}},$ $\text{МДж}/\text{кг}$
	%								
2Б	12,2	6,8	41,4	62,8	4,4	0,9	0,3	17,9	23,72
3Б	5,1	3,8	42,0	64,6	5,8	0,7	0,4	16,8	25,83
КХ	1,4	6,8	47,5	82,0	5,8	1,5	0,3	10,4	31,50
ЧД	0,6	8,0	37,5	85,7	5,6	1,3	0,3	7,1	33,77
ИЗ	5,0	9,2	39,2	78,2	5,0	2,2	0,8	13,8	23,94
ЧР	4,7	8,5	44,0	75,0	4,9	2,0	0,6	17,5	23,63
БК	2,9	9,8	4,2	91,8	1,8	1,1	–	5,0	33,22
КЗО	5,7	14,6	11,8	92,8	0,7	1,1	0,5	4,7	31,30
ТКО	4,1	2,5	85,1	46,4	5,7	–	0,2	47,7	17,68
ОП	3,5	–	80,2	55,6	5,5	0,3	–	38,6	22,04
ОСВ	4,2	48,5	80,3	53,0	5,8	3,4	2,0	35,8	21,45

Результаты термического анализа представлены на рисунке 1. Процесс горения топлив состоит из трех основных стадий: испарение влаги, выход и горение летучих веществ и горение коксового остатка.

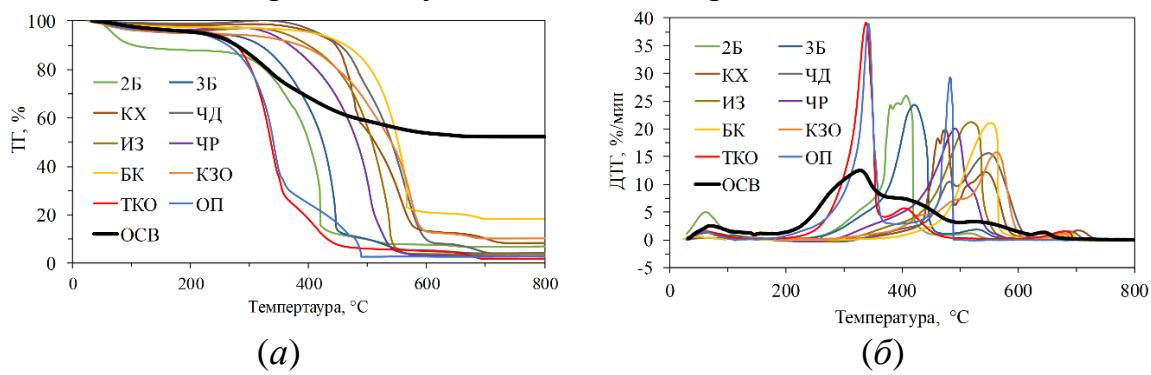


Рис. 1. Профили кривых при нагреве топлив: *a* – ТГ; *б* – ДТГ

При нагреве углей и карбонизатов процесс горения выражен одним пиком ДТГ соответствующим горению летучих веществ и коксового остатка, а при нагреве биомассы этот процесс выражен двумя пиками ДТГ, первый пик соответствует горению большого количества летучих веществ, а второй горению коксового остатка и догоранию летучих веществ (рисунок 1б). Основные характеристики горения представлены в таблице 2.

Таблица 2
Характеристики горения топлив

Топлива	$T_i, ^\circ\text{C}$	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T_b, ^\circ\text{C}$	$R_{\max}, \%/\text{мин}$	$S, \text{мин}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-3}$
2Б	331	379	540	29	1,5
3Б	357	421	551	24	1,3
КХ	445	472	722	19	0,5
ЧД	436	549	704	16	0,2
ИЗ	455	519	542	20	1,3
ЧР	422	492	541	28	1,0
БК	505	552	698	21	0,6
КЗО	479	564	658	26	0,6
ТКО	300	339	649	39	4,0
ОП	308	343	490	39	4,4
ОСВ	268	329	633	13	0,4

Биомасса обладает низкой температурой воспламенения и выгорания в отличие от углей и карбонизатов, при этом значения индекса горения у биомассы выше, чем у углей и карбонизатов, исключением являются только осадки сточных вод, которые обладают низкой температурой зажигания, высокой температурой выгорания и низким значением индекса горения.

В заключении можно отметить, что отходы промышленности и производства имеют высокий потенциал в качестве энергетического топлива, но необходимо исследовать каждое топливо в отдельности. Примером могут служить осадки сточных вод, имеющие высокую зольность, которую перед их использованием желательно снизить путем их обогащения, либо рассмотреть возможность использования золы осадка сточных вод в строительной сфере, например, в качестве добавки к бетону.

Список литературы:

1. Алехнович, А.Н. Богомолов, В.В., Артемьева, Н.В. Совместное факельное сжигание биомасс с углем // Теплоэнергетика, 2001 – № 2. – С. 26–33.

2. Рябов, Г.А. Совместное сжигание биомассы и ископаемых топлив – путь к декарбонизации производства тепла и электроэнергии (обзор) // Теплоэнергетика, 2022. – № 6. – С. 17–32.
3. Алекснович, А.Н. Новые технологии пылеугольного сжигания. Замена части угля // Электрические станции, 2021. – № 10(1083). – С. 2–7.
4. Рябов, Г.А. Развитие технологий совместного сжигания угля и биомассы // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу "Энергетик", 2022. – № 3. – С. 2–40.
5. Жуйков, А.В., Матюшенко, А.И., Кулагин, В.А., Степанов, С.Г., Кузнецов П.Н. Способы сжигания твердотопливных смесей в энергетических установках (обзор) // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2023. – Т. 16, № 7. – С. 805–825.
6. Zhuikov, A. Pyanykh, T., Kolosov, M. [et al.] Improving Energy Efficiency of Wastewater Residue Biomass Utilisation by Co-Combustion with Coal // Energies, 2025. – Vol. 18, No. 11. – Article No. 2906.

Информация об авторах:

Егор Викторович Храмцов, студент гр. ФЭ24-02б, СФУ, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79, hramtsov.jegor@yandex.ru

Андрей Владимирович Жуйков, к.т.н., СФУ, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79, azhuikov@sfu-kras.ru