УДК 662.739

А.В. ЖУЙКОВ, к.т.н., доцент (СФУ)
Д.О. ГЛУШКОВ, к.физ.-мат.н., доцент (ТПУ)
г. Красноярск, г. Томск

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗМА И ИНТЕНСИВНОСТИ НАГРЕВА ТВЕРДЫХ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ТОПЛИВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ

Применение высокореакционных топлив (полукокс, биотопливо, бурые угли) в качестве растопочного топлива для систем безмазутной растопки котлов, проектным топливом которых являются угли средней степени метаморфизма, показало их эффективность [1]. Для исследования характеристик процессов горения топлив широко применяют термический анализ, проводимый в окислительной среде [2]. Такой анализ позволяет определить группу характеристик процесса (например, температуры зажигания и выгорания коксового остатка [3]) в условиях относительно медленного нагрева топлива (единицы или десятки градусов в минуту).

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа характеристик зажигания твердых диспергированных топлив при разных механизмах и интенсивности нагрева.

В качестве перспективных компонентов к углям энергетических марок при реализации системы безмазутной растопки котлов в данной работе рассмотрены следующие твердые топлива (основные характеристики приведены в табл. 1):

Таблица 1

Характеристики твердых топлив.

№	Технический анализ				Элементный состав				
	W^a, %	A^d, %	V^{daf}, %	$Q^a_{s,v}$, МДж/кг	C^{daf}, %	H^{daf}, %	N^{daf}, %	S^{daf}, %	O^{daf}, %
1	1,20	15,45	8,20	27,06	76,82	1,41	0,76	0,38	3,99
2	4,80	2,00	73,52	16,45	50,30	6,00	0,20	0,10	43,40
3	14,11	4,12	47,63	22,91	73,25	6,52	0,79	0,44	18,99

№ 1 полукокс из балахтинского угля, полученный путем газификации методом обратной тепловой волны при температуре 800–900 ºС (ООО «Новая энергия»);

№ 2 сосновые опилки;
№ 3 бородинский бурый уголь.

Характеристики топлив (табл. 1) определены после достижения ими состояния аналитической пробы, влажность которой доведена до состояния равновесия с влажностью воздуха в лабораторном помещении. Исследуемые топлива с начальным размером не более 10 мм по отдельности измельчали в дисковой мельнице. Для подготовки топлив использовалась аналитическая просеивающая машина, размер частиц составил 140–200 мкм, что соответствует размерам пылеугольного топлива, используемого при факельном сжигании в энергетических котлах [4]. Влажность, зольность, выход летучих веществ, содержание серы, высшая теплота сгорания, содержание углерода, водорода, азота, серы и содержание кислорода определялись в соответствии ГОСТами [1].

Экспериментальные исследования в условиях, соответствующих условиям сжигания твердого пылеугольного топлива в топках котлов, выполнены с использованием оригинального экспериментального стенда (рис. 1).

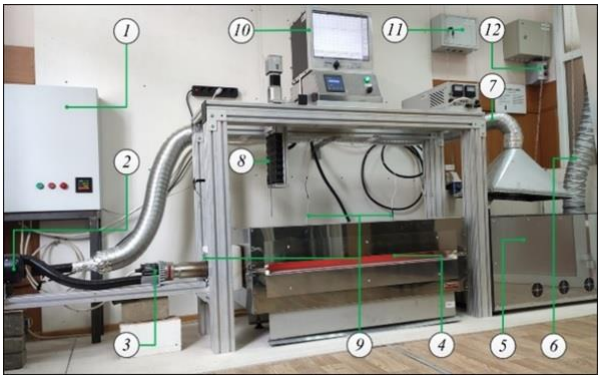


Рис. 1

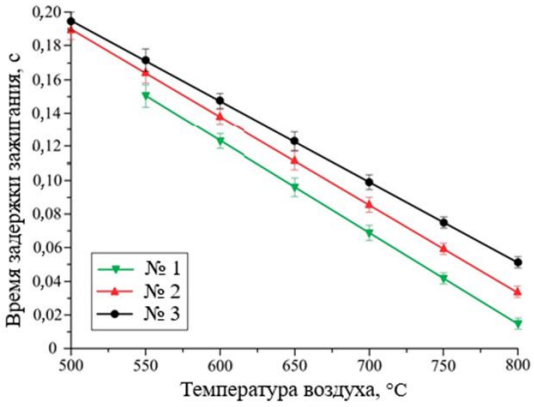


Рис. 2

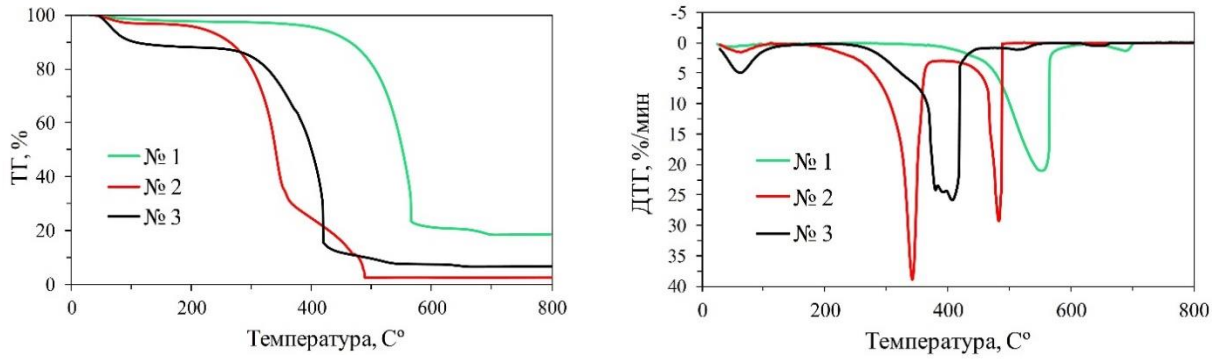
Рисунок 1. Внешний вид экспериментального стенда: *1* – щит управления; *2* – воздушный вентилятор; *3* – воздухонагреватель; *4* – муфельная печь с кварцевой трубой; *5* – воздухоохладитель; *6* – вытяжная вентиляция; *7* – система рециркуляции разогретого воздуха; *8* – механизм ввода мелкодисперсных частиц топлива в поток разогретого воздуха; *9* – термопары; *10* – многоканальный регистратор; *11* – щит электропитания; *12* – блок управления вытяжной вентиляцией

Рисунок 2. Зависимости времен задержки зажигания полукокса (№ 1), древесных опилок (№ 2), бурого угля (№ 3), от температуры потока разогретого воздуха при размерах частиц 140–200 мкм в условиях интенсивного нагрева

Экспериментальный стенд работает следующим образом: воздушный вентилятор *2* совместно с воздухонагревателем *3* нагнетают поток разогретого воздуха (со скоростью 5 м/с) в кварцевый цилиндр длиной 1 м, а трубчатая муфельная печь *4* поддерживает равномерное распределение температуры (гарантированно в диапазоне 20–850 °С) по всей длине кварцевого цилиндра за счет минимизации теплоотвода в окружающую среду. С помощью автоматизированного механизма *8* порция топлива массой 5 мг через керамический канал диаметром 6 мм, проходящий сквозь верхнюю крышку муфельной печи *4* (рис. 1) и соответствующее отверстие в стенке кварцевой трубы, вводилась в воздушный поток. Процессы, протекающие при движении мелкодисперсных твердых частиц в воздушном потоке (внутри кварцевого цилиндра) на протяжении 0,9 м, регистрировались через смотровую щель муфельной печи *4* (рис. 1) высокоскоростной цветной видеокамерой Phantom V411 (Vision Research, USA).

Рисунок 2 иллюстрирует зависимости времен задержки зажигания от температуры воздуха в диапазоне 500–800 °С при движении мелкодисперсных частиц полукокса (№ 1), древесных опилок (№ 2), бурого угля (№ 3) размерами 140–200 мкм в потоке разогретого воздуха (скоростью V_a=5 м/с). Левая граница температурного диапазона T_a=500 °С (рис. 2) является минимальным значением, при котором в условиях проведения эксперимента мелкодисперсные частицы твердых топлив (древесных опилок и бурого угля) воспламенялись за относительно короткий промежуток времени (менее 0,2 с). Полукокс начинал гореть при температурах воздушного потока T_a=550 °С. Правая граница температурного диапазона T_a=800 °С соответствует максимальному значению температуры воздушного потока, которое гарантированно поддерживают электрические нагреватели экспериментального стенда вдоль всей длины кварцевой трубы 4 (рис. 1). Полученные результаты (рис. 2) достаточно хорошо соответствуют результатам технического анализа (табл. 1) топлив. Времена задержки зажигания возрастают в последовательности: полукокс (№ 1), древесные опилки (№ 2), бурый уголь (№ 3). Наименьшие значения времени задержки полукокса (рис. 2) по сравнению с остальными топливами объясняются минимальным содержанием влаги и летучих в его составе (W_a=1,20 %, V_{daf}=8,20 %, табл. 1). После ввода мелкодисперсных частиц полукокса в поток разогретого воздуха практически вся подводимая теплота внешнего источника расходуется на прогрев и воспламенение углеродистого остатка. В свою очередь, древесина содержит

высокое количество летучих (более 70 %), а бурый уголь содержат в своем составе (табл. 1) высокое количество влаги (более 10 %) и летучих (более 40 %), поэтому теплота внешнего источника на начальном этапе индукционного периода расходуется на протекание эндотермических процессов термического разложения и фазового превращения (испарение влаги). Кроме этого, пористость частиц также влияет на характеристики зажигания топлива.



а) *б*)

Рис. 3. Профили горения полукокса (№ 1), древесных опилок (№ 2), бурого угля (№ 3) в условиях медленного нагрева: *а* – кривые потери массы; *б* – кривые скорости потери массы

Термический анализ топлив проводился с применением синхронного термоанализатора SDT Q600 (США). Кривые TG, DTG (рис. 3) снимали для навесок топлив массой 6,0±0,25 мг в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин. при скорости нагрева 20 °С/мин.

По кривым TG и DTG (рис. 3) определялась температура зажигания (T_i) и температура выгорания (T_b) по методу экстраполяции при пересечении касательных кривых TG и DTG [2]. Все характеристики горения, полученные при анализе профилей кривых, представленных на рис. 3, приведены в табл. 2. Значение температуры (T_{max}), соответствующей максимальной скорости потери массы (R_{max}), обычно считается обратно пропорциональным реакционной способности и горючести топлива [2].

Таблица 2

Характеристики горения топлив в условиях относительно медленного нагрева

№	T_i, °С	T_{max}, °С	T_b, °С	R_{max}, %/мин.
1	505	552	698	21
2	308	343	490	39
3	331	379	540	29

По результатам термического анализа самая низкая температура зажигания коксового остатка зарегистрирована у сосновых опилок 308 °С, а самая высокая температура зажигания – у полукокса 505 °С, бурый уголь имеет температуру зажигания 331 °С. Низкая температура зажигания зависит от раннего зажигания летучих, горение которых обеспечивает за счет дополнительного теплоподвода зажигание и горение коксового остатка.

Заключение

Результаты исследование процессов зажигания твердых топлив в рамках разных методик иллюстрируют разные характеристики. В условиях интенсивного нагрева наиболее реакционными свойствами обладает полукокс с минимальным содержанием летучих. При медленном нагреве большую реакционную способность и низкую температуру зажигания имеют сосновые опилки с высоким содержанием летучих. При разных условиях нагрева влияние на реакционность топлив оказывают разные факторы, что говорит о том, что для комплексного исследования горения топлив необходимо применять разные методы. Интенсивный нагрев в потоке горячего воздуха максимально приближен к топочным условиям, в отличие от медленного нагрева в синхронном термическом анализаторе. При термическом анализе реализуемо исследование всех последовательных стадий горения топлива, возможность определения температур зажигания и выгорания коксового остатка в отличие от условий интенсивного нагрева, когда процессы протекают за доли секунды. В обоих методах биомасса продемонстрировала относительно высокие характеристики, поэтому она является перспективным компонентом топливных смесей при безмазутной растопке котлов.

Список литературы:

1. D.O. Glushkov, A.I. Matiushenko, A.E. Nurpeiis, A.V. Zhuikov, An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement, Fuel Process. Technol. 223 (2021) 106986. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986.
2. Жуйков, А.В. Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Хакасия, сосновых опилок и их смесей / А.И. Матюшенко, П.Н. Кузнецов, О.П. Стебелева, А.С. Самойло // Журнал Сибирского федерального университета Серия: Техника и технологии. – 2021. – Т.14. – № 6. – С. 611–622.
3. A. Bala-Litwiniak, M. Zajemska, Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler, Renew. Energy 162 (2020) 151–159. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.139

4. H. Gerhardter, M. Knoll, R. Prieler, M. Landfahrer, M. Muhlbock, P. Tomazic, C. Hochenauer, Determining the heating characteristics of non-spherical particles in combusting flows, Appl. Therm. Eng. 151 (2019) 124–133. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.006.

Информация об авторах:

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

Глушков Дмитрий Олегович, доцент, к.физ.-мат.н, доцент, ТПУ, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30, dmitriyog@tpu.ru