

УДК 662.62

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И СОПОСТАВЛЕНИЕ СОСТАВА ГАЗОФАЗНЫХ ПРОДУКТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ СЖИГАНИЯ БУРОГО УГЛЯ И ЛИГНИНА

¹Калтаев А.Ж., ^{1,2,3}Ларионов К.Б., ^{1,2}Янковский С.А.,

^{1,2}Березиков Н.И., ^{1,2}Горшков А.С.

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: kaltaevalbert@gmail.com;

²ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева», Кемерово, e-mail: nib.free@gmail.com;

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС»,
Москва, e-mail: laryk070@gmail.com

Исследован процесс сжигания бурого угля и лигнина в виде топливных таблеток. Таблетки были подготовлены методом холодного прессования с помощью ручного пресса. Сжигание осуществлялось в камере сгорания при температуре 1000 °С. Исследование процесса горения осуществлялось методом высокоскоростной видеосъемки. Газофазный состав продуктов горения был определен с помощью поточного газоанализатора. По данным технического анализа установлено, что низшая теплота сгорания бурого угля и лигнина составила 22,9 и 21,1 МДж/кг соответственно. Разница между зольностью бурого угля и лигнина была незначительна, а выход летучих был выше на 33,9% у последнего. Относительное выделение газофазных продуктов горения лигнина NO_x/Q_i^f , SO_2/Q_i^f , CO_2/Q_i^f и CO/Q_i^f было ниже в сравнении с бурым углем на 37,2; 25,6; 4,4 и 1,3% соответственно. Значительных отличий в элементном составе исследуемых образцов лигнина и бурого угля не обнаружено. Процесс горения сопровождался образованием видимого пламени, объем которого превышал в 2–3 раза размер топливной таблетки. Скорость горения лигнина относительно бурого угля была выше, что косвенно указывает на более высокую реакционную способность.

Ключевые слова: бурый уголь, лигнин, сжигание, теплота сгорания, высокоскоростная видеосъемка, газофазные продукты

DETERMINATION AND COMPARISON OF GAS-PHASE PRODUCTS COMPOSITION FORMED IN THE PROCESS OF LIGNITE AND LIGNIN COMBUSTION

¹Kaltaev A.Zh., ^{1,2,3}Larionov K.B., ^{1,2}Yankovskiy S.A., ^{1,2}Berezikov N.I., ^{1,2}Gorshkov A.S.

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: kaltaevalbert@gmail.com;

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, e-mail: nib.free@gmail.com;

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow, e-mail: laryk070@gmail.com

The process of lignite and lignin combustion in the form of fuel pellets was studied. The pellets were prepared by cold pressing using a hand press. Combustion was carried out in a combustion chamber at a temperature of 1000 °C. The study of the combustion process was performed by the method of high-speed video recording. The gas-phase composition of the combustion products was determined using an in-line gas analyzer. According to the technical analysis, it was found that the net calorific value of lignite and lignin was 22.9 and 21.1 MJ/kg, respectively. The difference between the ash content of lignite and lignin was not significant, and the volatiles yield was 33.9% higher for the latter. The relative release of gas-phase combustion products of lignin NO_x/Q_i^f , SO_2/Q_i^f , CO_2/Q_i^f , and CO/Q_i^f was lower in comparison with lignite by 37.2, 25.6, 4.4, and 1.3%, respectively. No significant differences in the elemental composition of the studied samples of lignin and lignite were found. The combustion process was accompanied by the formation of a visible flame, the volume of which was 2-3 times the size of the fuel pellet. The burning rate of lignin relative to lignite was higher, which indirectly indicates a higher reactivity.

Keywords: lignite, lignin, combustion, calorific value, high-speed video recording, gas-phase products

В связи с ожидаемым уменьшением традиционного ископаемого топлива в обозримом будущем развитие альтернативной энергетики является первоочередной задачей [1]. Одним из лучших решений считается производство энергии из возобновляемой биомассы [2]. Биомасса в основном состоит из крупных полимеров, таких как целлюлоза, гемицеллюлоза, белки, крахмал, хитин и лигнин [3]. Лигнин представляет собой сложный биополимер, придающий механическую прочность стенкам растительных клеток, и является одним из наиболее рас-

пространенных в природе наряду с целлюлозой и хитином [4].

В настоящее время ежегодно производится около 100 млн т лигнина, 70 из которых используется в бумажной промышленности [5]. Лигнин хорошо горит в сухом виде, теплота сгорания сопоставима с ископаемым топливом.

Настоящее исследование направлено на определение и сопоставление технических характеристик и количественного состава газофазных продуктов, образующихся в процессе горения лигнина и бурого угля.

Цель исследования: оценка возможности использования лигнина в качестве основного вида топлива на энергетических предприятиях.

Материалы и методы исследования

В качестве исследуемых образцов были использованы бурый уголь марки ЗБ (Балахтинский район, Красноярский край) и лигнин (г. Черногорск, Республика Хакасия).

Перед проведением экспериментального исследования представленные выше образцы были измельчены и фракционированы на ситах с размером ячеек менее 200 мкм. Определение параметров влажности, зольности и выхода летучих веществ для всех рассматриваемых образцов было выполнено в соответствии со стандартными методиками ГОСТ Р 52911-2013, ГОСТ 11022-95 и ГОСТ Р 55660-2013.

Определение теплотворной способности рассматриваемых образцов (вышей и низшей теплоты сгорания) было выполнено в соответствии со стандартной методикой ГОСТ 147-2013 и бомбового калориметра АБК-1 (Русские энергетические технологии, Россия). Анализ проводился в изотермическом режиме при постоянном объеме в среде сжатого кислорода под давлением 30 кгс/см².

Содержание углерода, водорода, азота и серы в исследуемых образцах определяли с использованием анализатора Flash 2000 CHNS (Thermo Fisher Scientific, США). Анализы проводились в оловянных тиглях с использованием V₂O₅.

Перед проведением исследований процесса сжигания осуществлялась подготовка топливных гранул методом холодного прессования при работе гидравлического ручного пресса (рис. 1).

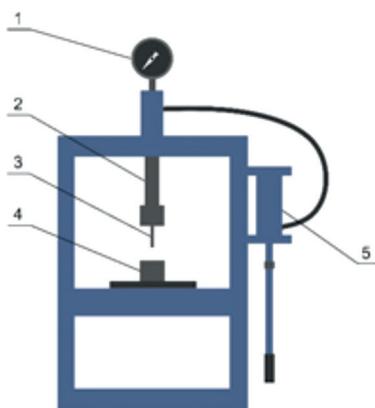


Рис. 1. Принципиальная схема установки по формированию топливных гранул методом холодного прессования (1 – манометр, 2 – шток гидравлического пресса, 3 – пуансон давления, 4 – матрица формирования топливной гранулы, 5 – масляный насос гидравлического пресса)

Навески (массой $\sim 0,5 \pm 0,01$ г) измельченных образцов помещались в матрицу со сквозным отверстием диаметром 8 мм с закрепленным к основанию упорным стаканом. Прессование осуществлялось пуансоном соответствующего диаметра, закрепленным на гидравлическом механизме пресса, с усилием 4 т метрической системы единиц. Внешний вид полученных топливных гранул представлен на рис. 2.

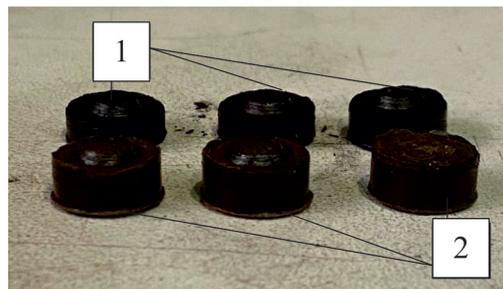


Рис. 2. Топливные гранулы (1 – бурый уголь, 2 – лигнин)

Исследование процесса горения проводилось с помощью экспериментального стенда, принципиальная схема и внешний вид которого представлены на рис. 3.

Основными элементами стенда (рис. 3) являются: камера сгорания в виде терморегулируемой печи ПМ-1400 (Русуниверсал, Россия) с цифровым регулятором температуры (погрешность измерений $\pm 1-3$ °С) объемом 0,012 м³; высокоскоростная видеокамера FASTCAM SA1 (Photron, США) с форматом изображения 1024×1024 пикселей, частотой съемки – 105 кадров в секунду; платформа координатного механизма, предназначенного для ввода в печь топливной насыпки с погрешностью перемещения в пространстве менее 1 мм; поточный газоанализатор Тест-1 (БОНЭР, Россия).

Для проведения исследования использовались гранулированные образцы массой $\sim 0,5 \pm 0,01$ г (рис. 2), которые перед подачей в терморегулируемую печь устанавливались на подложку. Подложка была прикреплена к трубке, через которую подводился воздух с расходом 2 л/мин, таким образом процесс горения сопровождался постоянной продувкой печи, что частично имитирует условия реального котлоагрегата.

Методика исследования процесса горения исследуемых образцов включала несколько этапов. В терморегулируемой печи устанавливалась требуемая температура греющей среды (1000 °С), регистрируемая хромель-алюмелевой термопарой.

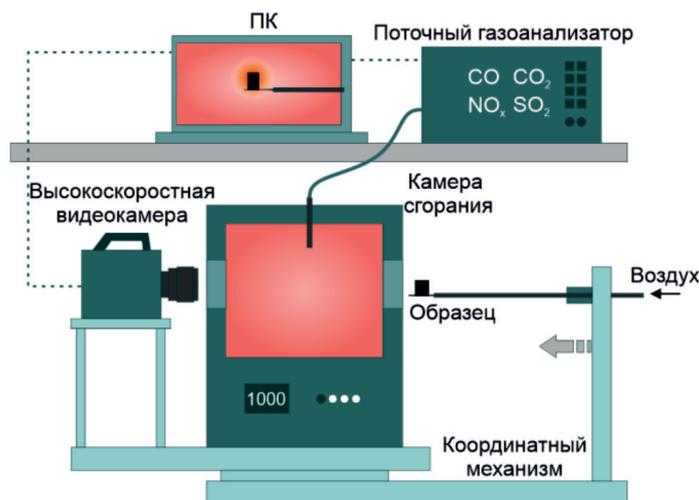


Рис. 3. Схема экспериментального стенда исследования процессов горения твердых топлив

Таблица 1

Технические характеристики исследуемых образцов

Наименование образца	Влажность W^a , мас. %	Зольность A^a , мас. %	Выход летучих веществ V^a , мас. %	Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг
Бурый уголь ЗБ	7,7	4,9	50,8	22,9
Лигнин	11,6	5,3	68,0	21,1

^a – аналитическая масса.

Таблица 2

Элементный состав исследуемых образцов

Наименование образца	Элементный состав ^a , мас. %			
	C	H	N	S
Бурый уголь ЗБ	64,7	4,9	0,8	0,2
Лигнин	63,2	4,8	0,2	0,1

^a – аналитическая масса.

Топливная гранула помещалась на держатель координатного механизма, ход которого калибровался по заданной координате в центр камеры сгорания и приводился в действие с помощью РС. Одновременно с началом движения штока с топливной насыпкой в сторону камеры сгорания проводилась видеофиксация. Уходящие газы (CO , CO_2 , NO_x , SO_2) через систему приточной вентиляции фиксировались с помощью поточного газоанализатора. Процесс горения считался законченным по данным газоанализатора (по постоянному значению образующихся газофазных соединений).

Для каждого изученного образца было проведено не менее пяти экспериментов в одинаковых условиях.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты определения физико-химических характеристик исследуемых образцов представлены в табл. 1 и 2.

Из табл. 1 следует, что образец лигнина характеризуется более высокими значениями технических характеристик (влажность, зольность, выход летучих веществ) в сравнении с бурым углем. Более низкое значение Q_i^r относительно бурого угля (на 1,8 МДж/кг) лигнина объясняется высокой влажностью (на 3,9 мас. %) и зольностью (на 0,4 мас. %) исследуемого образца.

Также из табл. 2 видно, что элементный состав исследуемых образцов не име-

ет существенных отличий (за исключением меньшего содержания азота в составе лигнина). Полученные значения физико-химических характеристик сопоставимы с другими органическими типами твердого топлива и по данному признаку могут быть использованы в качестве основного вида топлива на энергогенерирующих предприятиях (в частности, водогрейных и паровых котлах).

На рис. 4 представлены кадры высокоскоростной видеосъемки процесса горения исследуемых образцов при температуре греющей среды 1000 °С.

Из рис. 4 видно, что зажигание лигнина в отличие от бурого угля происходит быстрее, что обусловлено физико-химическими особенностями данных топлив (табл. 1 и 2). При этом существенных отличий в характере горения рассматриваемых типов топлив не зафиксировано. В целом можно заключить, что лигнин не представляет трудностей в части розжига и поддержания стабильности процесса его горения.

В табл. 3 представлены результаты определения подынтегральных площадей, образующихся газофазных продуктов горения исследуемых образцов топлива (массой 0,5 г).

В табл. 4 представлены численные значения полученных удельных показателей, образующихся газофазных продуктов к наименьшей теплоте сгорания топлива.

Из табл. 3 видно, что для образца лигнина зафиксировано меньшее значение площади подынтегральной кривой, характеризующей выделение газофазных продуктов горения. Для CO_2 и CO данное значение в среднем меньше на 12% и 9% соответственно. Для NO_x и SO_2 на 40% и 31% соответственно. Разница полученных значений в составе газофазных продуктов обусловлена различием в физико-химических характеристиках исследуемых образцов (табл. 1 и 2). Также более сниженные значения площади подынтегральных кривых связаны с более высокой реакционностью лигнина по сравнению с бурым углем. Различия в реакционной способности топлив проявляются в различных скоростях горения.

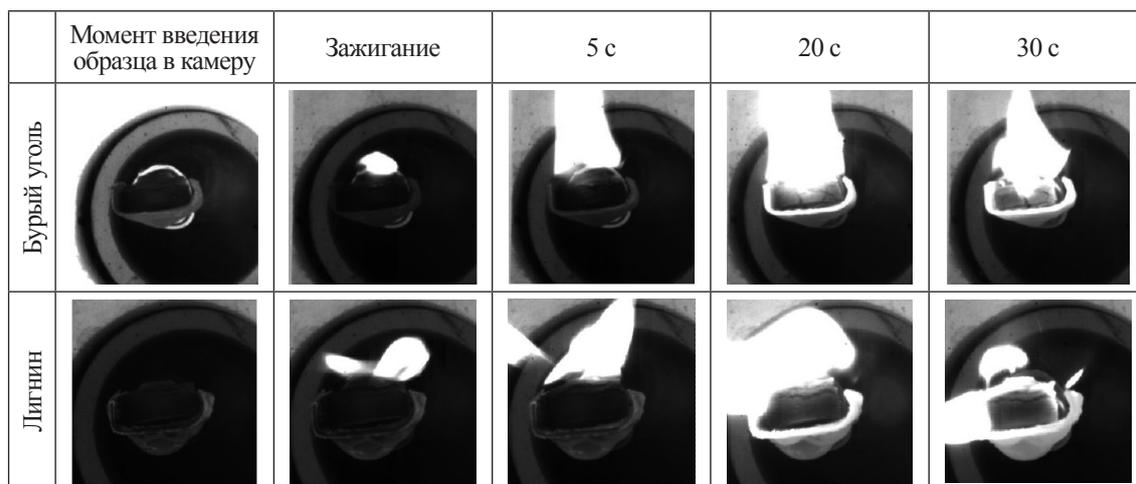


Рис. 4. Кадры высокоскоростной видеосъемки процесса горения исследуемых образцов (Зажигание: бурый уголь – 3,2 с, лигнин – 1,5 с)

Таблица 3

Площадь подынтегральных кривых исследуемых соединений, об. %

Проба	CO_2	CO	NO_x	SO_2
Бурый уголь ЗБ				
1	319,8	50,4	2,7	3,5
2	321,2	52,2	3,2	3,3
3	318,4	51,7	2,5	3,6
Лигнин				
1	280,2	46,3	1,5	2,3
2	283,3	46,4	1,6	2,6
3	281,5	47,6	1,7	2,2

Таблица 4

Удельное соотношение образующегося количества газофазных соединений к теплоте сгорания топлива, об. %/МДж/кг

Проба	CO ₂ /Q _i ^r	CO/Q _i ^r	NO _x /Q _i ^r	SO ₂ /Q _i ^r
Бурый уголь 3Б				
1	13,97	2,20	0,12	0,15
2	14,03	2,28	0,14	0,14
3	13,90	2,26	0,11	0,16
Лигнин				
1	13,28	2,19	0,07	0,11
2	13,43	2,20	0,08	0,12
3	13,34	2,26	0,08	0,10

В табл. 4 представлено соотношение выделяемого количества газофазных продуктов к теплоте сгорания топлива. Так для лигнина среднее значение удельного показателя CO₂/Q_i^r и CO/Q_i^r было ниже на 4,4% и 1,3% соответственно. Для NO_x/Q_i^r и SO₂/Q_i^r на 37,2% и 25,6% соответственно.

Заключение

По результатам экспериментального исследования установлено, что лигнин характеризуется схожими физико-химическими характеристиками, как и для бурого угля марки 3Б. Для образца лигнина было зафиксировано меньшее значение содержания серы и азота. При одинаковых значениях зольности разница значений низшей теплоты сгорания между образцами бурого угля и лигнина составила 1,8 МДж/кг. Данное различие обусловлено большим содержанием воды в составе лигнина, что обусловлено его технологическим происхождением.

Исследование процесса горения показало, что лигнин характеризуется более высокой реакционной способностью, что проявлялось в более быстром процессе горения. Данные, полученные в результате газофазного анализа, показали, что при сжигании лигнина образуется меньшее количество газофазных соединений. Для CO₂ и CO данное значение в среднем меньше на 12% и 9% соответственно. Для NO_x и SO₂ на 40%

и 31% соответственно. Полученные отличия обусловлены различием количественных значений, рассматриваемых образцов бурого угля и лигнина.

Вычисление удельного соотношения количества образующихся газофазных продуктов к значению низшей теплоты сгорания показало снижение выделения CO₂ и CO на 4,4% и 1,3%. Для NO_x/Q_i^r и SO₂/Q_i^r на 37,2% и 25,6% соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным соглашением о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).

Список литературы

1. IEA. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. 2021. P. 224.
2. Wiranarongkorn K., Phajam P., Im-orb K., Saebea D., Arpornwichanop A. Assessment and analysis of multi-biomass fuels for sustainable electricity generation. *Renew. Energy* 2021. Vol. 180. P. 1405–1418.
3. Isikgor F.H., Becer C.R. Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polym. Chem.* 2015. Vol. 6. № 25. P. 4497–4559.
4. Patel J.P., Parsania P.H. Characterization, testing, and reinforcing materials of biodegradable composites. *Biodegradable and Biocompatible Polymer Composites* Elsevier. 2018. P. 55–79.
5. Luo H., Abu-Omar M.M. Chemicals From Lignin. *Encyclopedia of Sustainable Technologies* Elsevier. 2017. P. 573–585.