

УДК 62-661.543.876
DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4990
Шифр специальности ВАК: 25.00.36

Исследования горения композитного топлива из угля и опилок

А.И. Сечин¹, Ю.Ф. Патраков²✉, И.Л. Мезенцева¹, А.А. Сечин¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Россия, г. Кемерово

✉ yupat52@gmail.com

Аннотация. Актуальность. В последнее десятилетие все актуальнее становится проблема необходимости утилизации на существующих тепловых станциях больших объемов как непроектных каменных углей и углеотходов, так и отходов деревообрабатывающей промышленности. Необходимость решения этих задач расширила исследовательскую область вопросов горения дисперсных горючих материалов, определив важность изучения совместного сжигания низкометаморфизованных энергетических углей, углеотходов и отходов деревопереработки, с целью рациональной утилизации промышленных отходов. **Цель.** Исследование горения композитного топлива из угля и опилок на основе экспериментальной методики и методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвеси в виде графической визуализации процесса горения. **Методы.** На основе методики исследования горения аэровзвеси и методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвеси в виде графической визуализации процесса горения изучается горение композитного топлива из угля и опилок. **Результаты и выводы.** Проведено изучение горения аэровзвеси композитного топлива из длиннопламенного угля Кузнецкого месторождения и древесных (сосна) опилок при их раздельном измельчении и совместном сжигании. Получена графическая визуализация интенсивности взрывного горения аэровзвеси угля и опилок в реакционном объеме от времени протекания процесса. Установлено, что исследуемый топливный состав может иметь достаточное и даже несколько избыточное количество летучих компонентов, что заставляет систему топливо–окислитель реагировать в процессе горения образованием второго пика горения. Установлено, что наиболее эффективное использование в топливном композите следующее соотношение компонентов: уголь – 70 %, опилки – 30 %. Эффективный коэффициент избытка топлива определяется как $\alpha=1$.

Ключевые слова: горение аэровзвеси, уголь, сосновые опилки, композит, графическая визуализация горения

Для цитирования: Исследования горения композитного топлива из угля и опилок / А.И. Сечин, Ю.Ф. Патраков, И.Л. Мезенцева, А.А. Сечин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 3. – С. 222–231. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4990

UDC 62-661.543.876
DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4990

Combustion of composite fuel from coal and sawdust

A.I. Sechin¹, Yu.F. Patrakov²✉, I.L. Mezentseva¹, A.A. Sechin¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, Kemerovo, Russian Federation

✉ yupat52@gmail.com

Abstract. Relevance. In the last decade, the problem of the necessity of utilizing large volumes of both non-design coal and coal waste, as well as waste of the wood processing industry at existing thermal power plants has become increasingly urgent. The solution of this problem expanded the research area of dispersed combustible materials combustion issues, making the study of joint combustion of low-metamorphosed power coals, coal waste and wood processing waste, as requirements for rational utilization of industrial waste. **Aim.** To study the composite fuel combustion from coal and sawdust based on the experimental technique and methodology for analyzing video files of air suspension ignition in the form of graphical visualization of combustion. **Methods.** Based on the methodology for studying the combustion of air suspension and the methodolo-

gy for analyzing video files of air suspension ignition in the form of graphical visualization of combustion, the combustion of composite fuel from coal and sawdust is studied. **Results and conclusions.** The authors have studied the combustion of composite fuel air suspension from long-flame coal of Kuznetsk deposit and wood (pine) sawdust during their separate grinding and joint combustion. They obtained the graphic visualization of intensity of explosive combustion of coal air suspension and sawdust in reaction volume from time of process flow. It was found that the studied fuel composition can have sufficient and even slightly excessive quantity of volatile components, which makes fuel-oxidizer system react during combustion by forming the second combustion peak. It was found that the most effective use in fuel composite is the following ratio of components: coal – 70%, sawdust – 30%. Effective coefficient of excess fuel is defined as $\alpha=1$.

Keywords: combustion of airborne particles, coal, pine sawdust, composite, graphical visualization of combustion

For citation: Sechin A.I., Patrakov Yu.F., Mezentsева I.L., Sechin A.A. Combustion of composite fuel from coal and sawdust. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 222–231. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4990

Введение

В последнее десятилетие все актуальнее становится проблема необходимости утилизации на существующих тепловых станциях больших объемов как непроектных каменных углей и углеотходов, так и отходов деревообрабатывающей промышленности. Проведенный сравнительный анализ характеристик углеотходов и отходов деревообрабатывающей промышленности показал возможность использования древесных отходов в виде композитных составов пылеугольного топлива [1–3].

Актуальность исследований, направленных на изучение совместного сжигания («ко-файринг») низкометаморфизованных энергетических углей, углеотходов и отходов деревопереработки, объясняется требованиями зеленой энергетики и рациональной утилизации отходов деревообрабатывающей и сельскохозяйственной промышленности [4, 5].

Под термином ко-файринг обычно подразумевается совместное сжигание топливных компонентов в одном реакционном объеме, при котором уделяется особое внимание взаимодействию неорганических компонент топлив – снижение выбросов оксидов азота и серы за счёт фиксации их в виде золы, а также изменение плавкости образующейся золы [6–8]. Авторы [9] обращают внимание, что отдельные частицы угля и растительного сырья в факеле горят различным образом, поэтому горение композитных топлив может существенно отличаться от горения отдельных компонентов. Находясь в факеле распыла, частицы композитного топлива, характеризуясь высокой величиной площади контакта фаз, могут оказывать значительное взаимное влияние при горении, что, как утверждают авторы [10, 11], может быть использовано для повышения эффективности сжигания топлива. Анализ столь многофакторной системы представляет собой сложную фундаментальную и методическую задачу.

Изучение условий распространения пламени в аэродисперсных средах проводится с различными целями. Нижний концентрационный предел взрываемости изучается с целью категорирования по-

мещений, обоснования выбора технологического оборудования и средств коммуникаций для осуществления производственного процесса, разработки безопасных методов и приемов при добыче и переработке угля [6]. Но получаемые результаты никогда не являлись определяющими при организации процессов горения топлива и топливных смесей в топочных устройствах с активными гидродинамическими режимами.

Целью данной работы являлось исследование горения композитного топлива из угля и опилок на основе экспериментальной методики и методологии анализа видеофайлов воспламенения аэрозвеси в виде графической визуализации процесса горения.

Методика исследования

Образцы порошков угля и древесных опилок готовились на мельнице роликового типа РМ-10 [10] из длиннопламенного угля Кузнецкого месторождения и опилок сосны. Исследования проводились на фракции 100–200 мкм как на наиболее технологичном размере. Состав композита готовился из компонентов непосредственно перед опытом.

Микроскопия частиц топлив проводилась в двух вариантах: 1) флюоресцентная микроскопия. Микроскопические исследования проводились с помощью Carl Zeiss AxioVert A1 с фильтрами возбуждения 450–490 и испускания >515 . Все эксперименты регистрировались с помощью монохроматической высокочувствительной камеры AxioCam 503 с трехкратным аналоговым усилением и временем экспозиции 0,1 с; 2) Просвечивающая оптическая микроскопия осуществлялась на Микроскопе Zeiss Axio Imager A1.

Исследования горения композитного топлива из угля и опилок проводились по разработанной авторами методике [11–13] на приборе и устройстве контроля и диагностики. Визуальные наблюдения образования и развития пламени проводились с помощью скоростной фотографии на основе модульной камеры So Ny IMX287 C Mount Gige 500/300fps.

После проведения экспериментов с целью визуализации результатов взрывного горения установ-

ливались индикаторы интенсивности горения аэровзвеси в реакционном объеме на основе анализа видеофайла горения аэродисперсной системы, времени протекания процесса и массы образца.

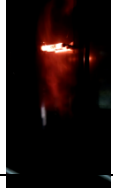
Обсуждение результатов

Результаты исследования и установления индикаторов интенсивности горения индивидуальных аэродисперсных систем представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты исследования горения аэровзвеси дисперсных систем индивидуальных компонентов композита при температуре источника зажигания 1100 °C и величине навески 1000 мг

Table 1. Results of the study of combustion of air suspension of dispersed systems of individual components of the composite at an ignition source temperature of 1100 °C and a sample size of 1000 mg

Video_20240202_130659			Video_20240206_124426		
Описание характера процесса/Description of the nature of the process Гетерогенное горение с ростом давления аэровзвеси/Heterogeneous combustion with increasing pressure of air suspension					
угольной /coal			из опилок/from sawdust		
Время, с Описание характера горения Time, s Description of combustion nature	Величина индикатора интенсивности горения Value of the combustion intensity indicator	Видеокадр Video frame	Время, с Описание характера горения Time, s Description of combustion nature	Величина индикатора интенсивности горения Value of the combustion intensity indicator	Видеокадр Video frame
0 Начало процесса Beginning of the process	0		0 Начало процесса Beginning of the process	0	
0,03 Формирование пылевого облака Dust cloud formation	0		0,03 Формирование пылевого облака Dust cloud formation	0	
0,06 Зажигание пылевого облака Dust cloud ignition	1		0,06 Зажигание и развитие горения пылевого облака Ignition and development of combustion of a dust cloud	6	
0,09 Развитие горения Combustion develop- ment	6		0,09 Процесс горения Combustion	6	
0,12 Процесс горения Combustion	6		0,12 Процесс горения с переходом к завершению Combustion with transition to completion	6	
0,15 Процесс горения Combustion	6		0,15 Завершение процесса Process completing	2	

0,18 Процесс горения Combustion	6		0,18 Завершение процесса Process completing	1	
0,21 Процесс горения с переходом к завершению Combustion with transition to completion	5		0,21 Завершение процесса Process completing	0,5	
0,24 Завершение процесса Process completing	5		0,24 Завершение процесса Process completing	0,5	
0,27 Завершение процесса Process completing	3		0,27 Завершение процесса Process completing	1	
0,3 Завершение процесса Process completing	0,5		0,3 Развитие процесса горения Combustion development	4	
0,33 Процесс завершен Process is complete	0		0,33 Процесс горения с переходом к завершению Combustion with transition to completion	5	
			0,36 Завершение процесса Process completing	4	
			0,39 Завершение процесса Process completing	2	
			0,42 Завершение процесса Process completing	0,5	
			0,45 Процесс завершен Process is complete	0	

Как показали проведенные исследования, скорость регистрации процесса горения до 300 fps на данном этапе достаточна для определения характера поведения пламени, а также установления индекса его распространения.

На рис. 1 представлены результаты визуализации взрывного горения аэровзвеси угля и опилок в реакционном объеме от времени протекания процесса.

Анализируя данный рисунок, мы видим, что у опилок как бы не вполне характерная зависимость горения. Это говорит о том, что в первой фазе горения длительностью до 0,12 с участвует только газопаровая фаза, выделившаяся из опилок. Тем временем облако частиц продолжает свое движение в зону инициирующего источника зажигания, в частицах происходит испарение более тяжелых фракций углеводородов. Эти углеводороды начинают гореть, и можно предположить, что одна часть из них горит целиком, а другая часть горит, распадаясь на составные компоненты, тем самым обеспечивая вторую волну горения.

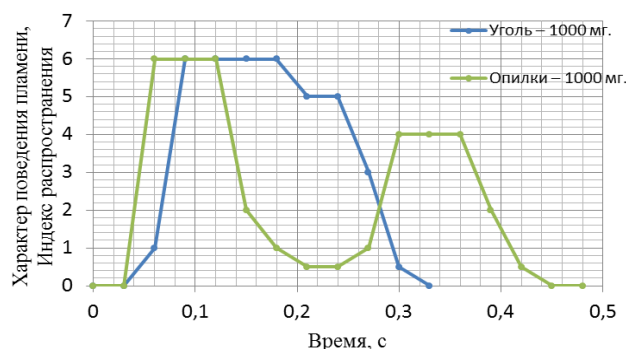


Рис. 1. Визуализация интенсивности взрывного горения аэровзвеси угля и опилок в реакционном объеме от времени протекания процесса и массы образца 1000 мг

Fig. 1. Visualization of the intensity of explosive combustion of coal and sawdust air suspension in the reaction volume from the time of the process and the sample mass of 1000 mg

Авторы [14] установили, что при 300 °С начинается процесс диссоциации, а с 350 °С начинается пиролиз. Также было установлено, что неравномерность температурного поля в образце приводит к тому, что начинает выделяться деготь, оксид и диоксид углерода. Оксид углерода начинает окисляться, что характеризуется ростом температуры.

Дальнейшее усиление процессов диссоциации ведет к увеличению перечня и объема углеводородных составляющих, которые в свою очередь, подвергаясь пиролизу и низкотемпературному окислению в предпламенных процессах, приводят к дальнейшему росту температуры.

Из рис. 1 видно, что горение аэровзвеси древесных опилок протекает за 0,45 с от начала процесса распыления, время индукции процесса зажигания составило 0,03 с, время зажигания — 0,03 с, время развития горения и достижения максимальных параметров по индексу распространения равному 6 (от начала процесса распыления и формирования облака) — 0,06 с, процесс горения при индексе 6 продолжался 0,06 с. Этот период отмечается ростом избыточного давления и считается периодом горячего горения [15–17]. На отрезке времени от 0,12 до 0,24 с происходит падение давления в реакционном сосуде и горение переходит в холоднопламенное протяженностью 0,06 с. Затем выделившиеся тяжелые летучие компоненты начинают свое горение, которое продолжается 0,25 с и выглядит следующим образом: от 0,24 с до 0,3 с идет развитие холоднопламенного горения [15–17], повышение давления не наблюдается, от 0,3 с до 0,36 с поддерживается холоднопламенное горение, а от 0,36 с начинается заключительный период горения, который составляет 0,09 с.

Время полного горения пылеугольного облака составляет 0,33 с от начала процесса распыления. Время индукции процесса зажигания составило 0,03 с, время зажигания — 0,03 с, а время развития горения и достижения максимальных показателей по индексу распространения равному 6 (от начала процесса распыления и образования облака) — 0,09 с. В целом процесс горения при индексе 6 продолжался 0,09 с. По аналогии с горением опилок данный период также можно считать горячим горением. На отрезке времени от 0,18 до 0,25 с происходит падение давления в реакционном сосуде и горение переходит в холоднопламенное протяженностью 0,025 с. Заключительный период горения аэровзвеси составил 0,06 с.

С целью определения режимов эффективного сжигания комбинированного топлива проведены исследования совместного сжигания угля и опилок в различных соотношениях компонентов (рис. 2).

Процесс взрывного горения (рис. 2) для соотношения уголь/опилки 900/100 продолжается 0,36 с. Время индукции процесса зажигания для данного соотношения, как и для всех смесей, составляет 0,06 с. Это связано со временем формирования аэродисперсного облака в реакционном объеме, его прогресса, газификации и инициирования горения. Время развития горения и образования очага горения составило 0,03 с, достижение параметров холоднопламенного горения по индексу распространения равному 5 (от начала процесса распыления и образования облака) — 0,12 с. Время достижения максимальных параметров горения по индексу распространения равному 6 (от начала процесса распыления и образования облака) — 0,15 с.

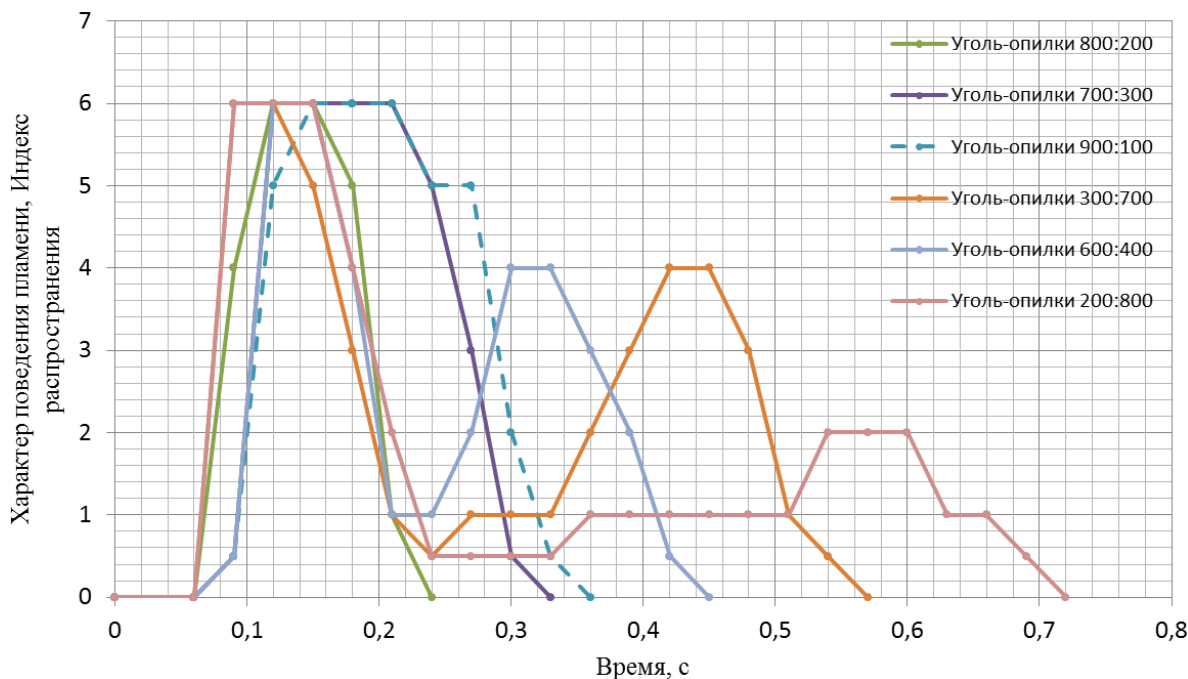


Рис. 2. Интенсивность взрывного горения аэрозвеси композита угля и опилок в реакционном объеме от времени протекания процесса и общей массе образца 1000 мг

Fig. 2. Intensity of explosive combustion of a composite of coal and sawdust in the reaction volume from the time of the process and the total mass of the sample of 1000 mg

Процесс горения при индексе 6 продолжался 0,06 с. Этот период отмечается ростом избыточного давления и считается периодом горячего горения [15, 18]. На отрезке времени от 0,21 до 0,24 с роста давления в реакционном сосуде не наблюдается и горение переходит в холоднотламенное с протяженностью перехода 0,03 с. Затем наступает период завершения горения длительностью в 0,09 с.

Построим сравнительную таблицу и продолжим анализ результатов исследования визуализации интенсивности горения композита уголь–опилки, представленных на рис. 2. Рассмотрим с позиции горения пылевого облака, то есть факторов инициирования процесса зажигания и распространения фронта пламени по созданному объекту (аэродисперсное облако).

Характеризуя показатель «Полное время горения», можно сказать, что для всех композитных составов данный показатель не может являться определяющим, хотя он имеет разброс результатов, в три раза превышающий минимальный результат. Можно ожидать, что, выбирая показатель с разбросом в два раза (0,33 с), можно рекомендовать более устойчивый состав топливной смеси при горении. Присутствие опилок в композите обеспечит высокотемпературную подсветку процесса горения на стартовом периоде.

«Время индукции процесса зажигания» оказалось у всех одинаковым. Здесь сработал фактор наличия в композите большого количества летучих компонентов.

Показатель «Время развития горения и образования очага горения» присутствует у всех шести композитных составов.

Показатель «Время достижения максимальных параметров по индексу распространения» присутствует только у одной смеси 900/100. Это свидетельствует о характере этапов развития процесса горения: от холоднотламенного (индекс 5) к горячепламенному (индекс 6). У других составов этот показатель характеризуется индексом 6. Можно утверждать, что процесс горения осуществляется в режиме горячего газового пламени.

Показатель «Длительность процесса горения при показателе индекса 5» характеризует протяженность времени этапа развития процесса горения: от холоднотламенного (индекс 5) к горячепламенному (индекс 6), который присутствует только у одной смеси 900/100. Данный результат показывает, что вклад опилок в процесс горения аэрозвеси обеспечивает высокотемпературную подсветку процесса горения угольного компонента.

Показатель «Длительность процесса горения при показателе индекса 6, с» отображает, что самое эффективное горение наблюдается у смеси 700/300, который составляет 0,09 с. Это очень интересное соотношение топливо–окислитель, при достаточном количестве окислителя наблюдается процесс горения с самым мощным ростом давления в реакционном объеме, что характеризует полноту протекающих реакций.

Таблица 2. Результаты исследования визуализации интенсивности горения аэровзвеси композита уголь–опилки

Table 2. Results of studying the visualization of combustion intensity of the air suspension of the coal–sawdust composite

Показатель визуализации интенсивности взрывного горения аэровзвеси композита уголь/опилки от времени протекания процесса Visualization index of the intensity of explosive combustion of the composite coal/sawdust air suspension from the time of the process		Соотношение в композите уголь/опилки Ratio in the coal/sawdust composite					
		900/100	800/200	700/300	600/400	300/700	200/800
		Время горения, с Combustion time, s					
Полное время горения, с Total combustion time, s		0,36	0,24	0,33	0,45	0,57	0,72
Время индукции процесса зажигания, с Induction time of ignition, s		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Время развития горения и образования очага, с Time of combustion development and fire formation, s		0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Время достижения максимальных параметров по индексу распространения, равному: Time to reach maximum parameters for the distribution index equal to:	5 с/с	0,3 (0,12)	–	–	–	–	–
	6 с/с	0,03	0,03	0,03 (0,12)	0,03 (0,12)	0,03 (0,09)	0,03 (0,09)
Длительность процесса горения по индексу распространения, равному 6, с Combustion duration according to the spread index equal to 6, s		0,06	0,03	0,09	0,03	0,03	0,06
Длительность перехода в холоднопламенное горение с протяженностью перехода от индекса Duration of transition to cold flame combustion with the duration of the transition from the index	6 до (to) 5	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	–
	менее (less than) 5	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,09
Длительность процесса горения по индексу распространения, равному 5, с Combustion duration according to the spread index equal to 5, s		0,03	–	–	–	–	–
Второй пик горения Second combustion peak	Время достижения максимальных параметров по индексу распространения, равному 4 с Time to reach maximum parameters according to the distribution index equal to 4 s	–	–	–	0,09	0,21	0,30
	Длительность процесса горения по индексу распространения, равному 4, с Combustion duration according to the spread index equal to 4, s	–	–	–	0,03	0,03	0,06
	Длительность перехода в холоднопламенное горение с протяженностью до индекса 1 Duration of transition to cold flame combustion with an extension up to index 1	–	–	–	0,08	0,06	0,06
Длительность процесса горения по индексу распространения, равному 5, с Combustion duration according to the spread index equal to 5, s		0,03	–	–	–	–	–
Длительность периода завершения горения, с Duration of combustion completion period, s		0,03	0,3	0,06	0,04	0,06	0,06

В то же время показатель «Длительность процесса горения при показателе индекса 5, с» отображает длительность холоднопламенного горения на заключительной стадии горения пылевого облака. Данный показатель присутствует только у со-

става 900/100. У других составов ввиду увеличения объема газовой фазы, выделяемой из увеличивающегося объема опилок, он не определяется.

Показатель «Длительность периода завершения горения, с» характеризует полноту сгорания топ-

ливного облака. Чем длительнее это время, тем большее количество зольности в топливе. Косвенно оценивается степень недожога распыляемого топлива. В нашем случае только три состава заслуживают внимания: 900/100; 800/200 и 700/300. Из них наиболее привлекателен 700/300. Другие составы для данной марки угля не рассматриваются ввиду наличия второго пика горения, что также характеризует тепловые потери процесса сжигания топлива.

Показатель «Второй пик горения» характеризует не вполне изученные топливные составы. Тот факт, что исследуемый топливный состав имеет достаточное и даже несколько избыточное количество летучих компонентов, заставляет систему топливо–окислитель так реагировать в процессе горения. Данный эффект отражался в работах [9, 10, 16, 18] и закладывался при разработке прибора контроля и диагностики композитного состава угля и отходов деревообрабатывающей промышленности, и он заключается в получении максимального количества информации о свойствах создаваемой топлив-

ной системы в виде аэродисперсного облака и геометрии реакционного объема [19, 20].

Анализ результатов исследований, представленных в табл. 2, позволяет рекомендовать использование композитного топлива уголь/опилки в соотношении 7:3. Эффективная тонина помола 200 мкм. Эффективный коэффициент избытка топлива α определяется как $\alpha=1$.

Заключение

1. Изучено композитное топливо из угля и древесных опилок путем проведения лабораторных исследований горения аэровзвеси топлива при раздельном измельчении и совместном сжигании («ко-файринг») данного состава.
2. Установлено, что наиболее эффективное использование топливного композита уголь/опилки в соотношении 7:3. Эффективная тонина помола 200 мкм. Эффективный коэффициент избытка топлива α определяется как $\alpha=1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Co-milling as a synergy factor for co-firing. A case study of wood/coal blends / A.G. Matveeva, Yu.F. Patrakov, A.I. Sechin, P.E. Plyusnin, A.V. Kuznetsov // Carbon Resources Conversion. – 2023. – Vol. 6. – № 1. – P. 51–57. DOI: 10.1016/j.crcon.2022.11.001
2. Experimental study of the influence of synergistic effects on the co-firing characteristics of biomass and coal / Yang Pu, Haofan Wang, Xianhua Wang, Mooktzeng Lim, Bin Yao, Haiping Yang, Chun Lou // Journal of the Energy Institute. – 2024. – Vol. 115. – P. 101687. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101687
3. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: a review / N. Gaurav, S. Sivasankari, G.S. Kiran, A. Ninawe, J. Selvin // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 73. – P. 205–214. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.070
4. Ayhan Demirbas. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections// Energy Conversion and Management. – 2008. – Vol. 49. – P. 2106–2116. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.02.020
5. Technical-economic-environmental analysis of biomass direct and indirect co-firing in pulverized coal boiler in China / Wenyu Mo, Kuan Du, Yi Sun, Minruo Guo, Chao Zhou, Mo You, Jun Xu, Long Jiang, Yi Wang, Sheng Su, Song Hu, Jun Xiang // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 426. – P. 139119. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139119
6. Experimental study of NO emission in coal-methanol co-combustion under air-staged condition / Jun Chen, Xin Wang, Weidong Fan, Tingjiang Liu, Yong Wang, Wei Geng // Journal of the Energy Institute. – 2024. – Vol. 117. – P. 101835. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101835
7. Riaz J., Gibbins J., Chalmers H. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass // Fuel. – 2017. – Vol. 202. – P. 650–655. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.04.011
8. Co-firing of coal and biomass under pressurized oxy-fuel combustion mode in a 10 kWth fluidized bed: Nitrogen and sulfur pollutants / Qinwen Liu, Wenqi Zhong, Aibing Yu, Chi-Hwa Wang // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 450. – P. 138401. DOI:10.1016/j.cej.2022.138401
9. Mechanochemical production of lignin-containing powder fuels from biotechnology industry waste: a review / O. Lomovsky, A. Bychkov, I. Lomovsky, V. Logvinenko, A. Burdukov // Thermal Science. – 2015. – Vol. 19. – Iss. 1. – P. 219–229. DOI: 10.2298/TSCI130820167L
10. Сечин А.И., Патраков Ю.Ф., Сечин А.А. Методика экспериментального определения пределов распространения пламени по пылевоздушным смесям // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 87–90.
11. Patrakov Y.F., Sechin A.I., Sechin A.A. Experimental range test of flame spread in dust-air mixtures// Journal of Mining Science. – 2019. – Vol. 55. – P. 494–498. DOI: 10.1134/S106273911903582X
12. ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 144 с.
13. Сечин А.И., Задорожная Т.А. Изучение условий низкотемпературного окисления в слое лесных горючих материалов // Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XV Международной научно-технической конференции. – 2022. – С. 231–232. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/74424> (дата обращения 15.01.2025).
14. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука. 1980. – 478 с.
15. Кулагин Сэитиро. Горение / пер. С.К. Орджоникидзе, Б.С. Ермолаев. – М.: Химия, 1979. – 255 с.
16. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура / пер. с англ. под ред. А.С. Соколика. – М.: Металлургия, 1959. – 333 с.

17. Sandrowitz A.K., Cooke J.M., Glumac N.G. Flame emission spectroscopy for equivalence ratio monitoring // *Applied Spectroscopy*. – 1998. – Vol. 52. – Iss. 5. – P. 658–662. DOI: 10.1366/0003702981944319
18. Бойко Е.А., Страшников А.В. Обоснование практических рекомендаций по организации оптимальных режимов предварительной термической обработки и сжигания угля в пылевидном состоянии // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. – 2022. – № 1. – С. 35–50. URL: <https://journals.rcsi.science/0002-3310/article/view/136941> (дата обращения 15.01.2025).
19. Копань А.В., Клейнерман В.А., Тестирование технических решений по топочно-горелочным устройствам в составе низкоэмиссионной системы сжигания кузнецкого угля // *Известия политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 140–147. DOI: 10.18799/24131830/2021/4/3157
20. СП 89.13330.2016. Свод правил. Котельные установки. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054199> (дата обращения 15.01.2025).

Информация об авторах

Александр Иванович Сечин, доктор технических наук, профессор отделения контроля и диагностики Института неразрушающего контроля, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. sechin@tpu.ru

Юрий Федорович Патраков, доктор химических наук, заведующий лабораторией научных основ технологий обогащения угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии, Сибирское отделение Российской академии наук, Россия, 650065, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10. yupat52@gmail.com

Ирина Леонидовна Мезенцева, старший преподаватель отделения контроля и диагностики Института неразрушающего контроля, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. mezenceva@tpu.ru

Андрей Александрович Сечин, кандидат технических наук, доцент отделения контроля и диагностики Института неразрушающего контроля, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. seanal@tpu.ru

Поступила в редакцию: 04.02.2025

Поступила после рецензирования: 10.02.2025

Принята к публикации: 03.03.2025

REFERENCES

1. Matveeva A.G., Patrakov Yu.F., Sechin A.I., Plyusnin P.E., Kuznetsov A.V. Co-milling as a synergy factor for co-firing. A case study of wood/coal blends. *Carbon Resources Conversion*, 2023, vol. 6, no. 1, pp. 51–57. DOI: 10.1016/j.crcon.2022.11.001
2. Yang Pu, Haofan Wang, Xianhua Wang, Mooktzeng Lim, Bin Yao, Haiping Yang, Chun Lou. Experimental study of the influence of synergistic effects on the co-firing characteristics of biomass and coal. *Journal of the Energy Institute*, 2024, vol. 115, pp. 101687. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101687
3. Gaurav N., Sivasankari S., Kiran G.S., Ninawe A., Selvin J. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 73, pp. 205–214. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.070
4. Ayhan Demirbas. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 2106–2116. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.02.020
5. Wenyu Mo, Kuan Du, Yi Sun, Minruo Guo, Chao Zhou, Mo You, Jun Xu, Long Jiang, Yi Wang, Sheng Su, Song Hu, Jun Xiang. Technical-economic-environmental analysis of biomass direct and indirect co-firing in pulverized coal boiler in China. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 426, pp. 139119. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139119
6. Jun Chen, Xin Wang, Weidong Fan, Tingjiang Liu, Yong Wang, Wei Geng. Experimental study of NO emission in coal-methanol co-combustion under air-staged condition. *Journal of the Energy Institute*, 2024, vol. 117, pp. 101835. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101835
7. Riaza J., Gibbins J., Chalmers H. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass. *Fuel*, 2017, vol. 202, pp. 650–655. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.04.011
8. Qinwen Liu, Wenqi Zhong, Aibing Yu, Chi-Hwa Wang Co-firing of coal and biomass under pressurized oxy-fuel combustion mode in a 10 kWth fluidized bed: Nitrogen and sulfur pollutants. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 450, pp. 138401. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138401
9. Lomovsky O., Bychkov A., Lomovsky I., Logvinenko V., Burdukov A. Mechanochemical production of lignin-containing powder fuels from biotechnology industry waste: a review. *Thermal Science*, 2015, vol. 19, no. 1, pp. 219–229. DOI: 10.2298/TSCI130820167L
10. Sechin A.I., Patrakov Yu.F., Sechin A.A. Methodology for experimental determination of flame propagation limits for dust-air mixtures. *Mining Journal*, 2017, vol. 12, no. 12, pp. 87–90. (In Russ.)
11. Patrakov Y.F., Sechin A.I., Sechin A.A. Experimental range test of flame spread in dust-air mixtures. *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, pp. 494–498. DOI: 10.1134/S106273911903582X
12. SS 12.1.044-89. *Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods for their determination*. Moscow, Publ. House of Standards, 1990. 144 p. (In Russ.)
13. Sechin A.I., Zadorozhnaya T.A. Study of the conditions of low-temperature oxidation in a layer of forest combustible materials. *Modern problems of mechanical engineering. Collection of proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference*. 2022, pp. 231–232. (In Russ.) Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/74424> (accessed 15 January 2025).

14. Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Mathematical theory of combustion and explosion*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 478 p. (In Russ.)
15. Kumagai Seiichiro. *Combustion*. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 255 p. (In Russ.)
16. Heidon A.G., Wolfhard H.G. *Flame, its structure, radiation and temperature*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1959. 333 p. (In Russ.)
17. Sandrowitz A.K., Cooke J.M., Glumac N.G. Flame Emission spectroscopy for equivalence ratio monitoring. *Applied Spectroscopy*, 1998, vol. 52, no. 5, pp. 658–662. DOI: 10.1366/0003702981944319
18. Boyko E.A., Strashnikov A.V. Justification of practical recommendations for organizing optimal modes of preliminary heat treatment and combustion of coal in a powdered state. *News of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2022, no. 1, pp. 35–50. (In Russ.) Available at: <https://journals.rcsi.science/0002-3310/article/view/136941> (accessed 15 January 2025).
19. Kopan A.V., Kleinerman V.A. Testing technical solutions for furnace and burner devices as part of a low-emission combustion system for Kuznetsk coal. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 140–147. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/4/3157
20. SP 89.13330.2016. *Code of Practice. Boiler Installations*. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456054199> (accessed 15 January 2025).

Information about the authors

Alexander I. Sechin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. sechin@tpu.ru

Yuri F. Patrakov, Dr. Sc., Head of the Laboratory, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Leningradsky avenue, Kemerovo, 650065, Russian Federation. yupat52@gmail.com

Irina L. Mezentseva, Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mezenceva@tpu.ru

Andrey A. Sechin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. seanal@tpu.ru

Received: 04.02.2025

Revised: 10.02.2025

Accepted: 03.03.2025