

УДК 62-661.543.876
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4968
Шифр специальности ВАК: 25.00.36

Разработка экспериментальной методики прогнозирования стадии воспламенения аэровзвеси на основе визуализации видеофайлов процесса горения

А.И. Сечин¹, Ю.Ф. Патраков², И.Л. Мезенцева^{1✉}, А.А. Сечин¹

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

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

✉ mezenцева@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Проблемы, возникающие при разработке топливных композитов и заключающиеся в определении оптимального соотношения горючих компонентов, решаются при исследовании их физико-химических и эксплуатационных свойств. Особое внимание необходимо уделять процессам воспламенения и горения аэровзвеси топливных составов. **Цель.** Реализация данных задач видится в разработке экспериментальной методики прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов на основе методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвеси в виде графической визуализации процесса горения. **Методы.** Методика оценки и прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов, полученных на основе методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвеси в виде графической визуализации процесса горения. **Результаты и выводы.** Получена зависимость прогнозной величины определения коэффициента избытка воздуха для углей и углеотходов. Разработана методология графической визуализации процесса горения аэровзвеси углей и углеотходов. Проведено исследование Кузнецкого угля марки Д, и даны описания его горения в случае сжигания в активных гидродинамических режимах. Разработанный метод оценки и прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов, полученных на основе методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвеси в виде графической визуализации процесса горения, показал свою эффективность. Он показал хорошее распределение по всему объему пылеугольных частиц в газопылевом облаке, демонстрируя устойчивое и эффективное горение топливной системы. Конвективные потоки в реакционной камере не разрывают формирующийся фронт горения. Графическая визуализация процесса горения показала, что в процессе горения наблюдается минимальное время деструктивных процессов, происходящих в угольных частицах, что говорит об эффективном тепломассопереносе. Для исследуемой системы Кузнецкого угля марки Д оптимальные соотношения горючее–окислитель α составляет 1,25. Окислительные реакции в этом случае протекают в более короткое время, что характеризуется ростом давления в реакционном объеме.

Ключевые слова: коэффициент избытка воздуха, горение аэровзвесей, уголь, факел горения, холодное пламя

Для цитирования: Разработка экспериментальной методики прогнозирования стадии воспламенения аэровзвеси на основе визуализации видеофайлов процесса горения / А.И. Сечин, Ю.Ф. Патраков, И.Л. Мезенцева, А.А. Сечин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 241–250. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4968

UDC 62-661.543.876
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4968

Development of an experimental method for predicting the ignition stage of an airborne suspension based on visualization of combustion video files

A.I. Sechin¹, Yu.F. Patrakov², I.L. Mezentseva^{1✉}, 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

✉ mezenцева@tpu.ru

Annotation. Relevance. The problems arising in developing fuel composites and consisting in determining the optimal ratio of combustible components are solved in the study of their physicochemical and operational properties. Particular attention should be paid to ignition and combustion of the air suspension of fuel compositions. **Aim.** The implementation of these problems is seen in the development of an experimental technique for predicting some indicators of coals and coal waste based on the methodology of analyzing video files air suspension of ignition in the form of a graphical visualization of combustion. **Methods.** Technique for assessing and predicting some indicators of coals and coal waste obtained on the basis of the methodology of analyzing video files of air suspension ignition in the form of a graphical visualization of combustion. **Results and conclusions.** The authors have obtained the dependence of the predicted value for determining the air excess coefficient for coals and coal waste. They developed the methodology for graphical visualization of the combustion of coals and coal waste air suspension. The Kuznetsk coal of grade D was studied and its combustion was described in the case of combustion in active hydrodynamic modes. The developed method for assessing and predicting some indicators of coals and coal waste obtained on the basis of the methodology for analyzing video files of air suspension ignition in the form of graphical visualization of the combustion proved its effectiveness. It showed a good distribution of dust-coal particles in a gas-dust cloud throughout the volume, demonstrating stable and efficient combustion of the fuel system. Convective flows in the reaction chamber do not break the forming combustion front. Graphic visualization of combustion showed that during this process, there is a minimum time of destructive processes occurring in coal particles. This indicates efficient heat and mass transfer. For the studied system of Kuznetsk coal of grade D, the optimal fuel-oxidizer ratio α is 1.25. Oxidation reactions in this case occur in a shorter time, which is characterized by an increase in pressure in the reaction volume.

Keywords: air excess coefficient, combustion of air suspensions, coal, combustion torch, cold flame

For citation: Sechin A.I., Patrakov Yu.F., Mezentsseva I.L., Sechin A.A. Development of an experimental method for predicting the ignition stage of an airborne suspension based on visualization of combustion video files. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 241–250. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4968

Введение

Проблемы, возникающие при разработке топливных композитов и заключающиеся в определении оптимального соотношения горючих компонентов, решаются при исследовании их физико-химических и эксплуатационных свойств. Особое внимание необходимо уделять процессам воспламенения и горения аэрозвеси топливных составов.

Работа котельных агрегатов предъявляет ряд специфических требований как к известному топливу, так и к вновь разрабатываемым топливным композитам, производство которых сопряжено с экономическими и экологическими требованиями. Успешное решение данной задачи видится в исследовании физико-химических и эксплуатационных свойств топлив и топливных композитов. При этом необходимо уделять особое внимание процессам воспламенения и горения аэрозвеси топливных составов. Ряд зарубежных авторов [1, 2] предлагает совместное сжигание угля и метанола либо угля вместе с отходами биомассы, что, по их мнению, позволяет снизить влияние топливной промышленности на окружающую среду, а также подобрать методы сжигания, обеспечивающие технически и экономически рациональные варианты для угольных электростанций [3, 4].

Реализация данных задач видится в разработке экспериментальной методики прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов на основе методологии анализа видеофайлов воспламенения аэрозвесей в виде графического отображения процесса горения.

Методика исследования и результаты

Уголь, являясь полифункциональным ресурсом, широко используется в целом ряде отраслей народного хозяйства. Различают три основных вида углей: антрацит, бурый и каменный [5].

Уголь, идущий на сжигание в топочных устройствах факельного типа, проходит предварительную подготовку и при дисперсности до 300 мкм он имеет уже другие характеристики.

Традиционно сжигание топлива осуществляется путем подачи угля в виде пылевоздушной смеси в топку котельного агрегата при коэффициенте избытка воздуха α от 0,9 до 1,4 [6, 7].

Установлено [8], что коэффициент избытка топлива α определяется для поддержания следующих показателей:

- качественного соотношения при смешении топлива и воздуха;
- снижения тепловых потерь с отходящим дымовым газом;
- более высокой полноты сгорания топлива, что минимизирует образование сажи и копоти в камере сгорания и снижает перерасход топлива, т. к. из практики известно [8] что каждый вид топливо-сжигающей установки имеет свой коэффициент избытка воздуха (например для трубчатых печей α составляет 1,1–1,4).

Выбор необходимой величины избытка воздуха определяется конструктивными характеристиками топочного устройства [8–10]. Установлено, что увеличение α ускоряет процесс сжигания горючего газа в горелках, а при недостатке воздуха и плохом смешении кислорода с газом происходит неполное

сгорание. Также практика установила [9], если невозможно определить коэффициент избытка кислорода α по балансу азота, исходят из более общего вывода. Считается [9], что если α меньше единицы, в топливной смеси наблюдается недостаток кислорода, а при α большей единицы топливная система содержит избыток кислорода. Когда $\alpha=1$, топливная система соответствует стехиометрическому соотношению составных частей данного топлива и окислителя, что обеспечивает полное ее сжигание.

В классическом представлении [9] отношение действительного расхода воздуха V_d , подаваемого на сжигание топлива, к его теоретическому значению V_o и называют коэффициентом избытка (расхода) воздуха:

$$\alpha = V_d / V_o.$$

Рассмотрим подробнее коэффициент избытка воздуха α – это многопараметрический показатель, теоретическое определение которого в настоящий момент весьма затруднительно. А вот экспериментальное определение коэффициента избытка воздуха α для некоторого пылевидного топлива – вполне реализуемая задача.

Проведем анализ установки, представленной в работах [11, 12].

Рассуждения строим с учетом того, что коэффициент избытка воздуха α традиционно от 0,9 до 1,2. Также считается [9], что для сжигания 1 кг топлива необходимо 3,6 м³ воздуха.

Следовательно, при формировании пылевого облака с угольной навеской в 1000 мг необходимо иметь экспериментальный реакционный объем в 3,6 л. В этом случае коэффициент избытка воздуха $\alpha=1$. Другими словами на 1 г угля нужно 4,41 г воздуха (барометрическое давление 760 мм. рт. ст. и температуре +15 °С).

Необходимо установить область, которая формируется геометрией реакционного объема при создании в ней аэровзвеси в условиях $\alpha=0,9-1,2$.

При данных атмосферных условиях 1 м³ воздуха весит 1,225 кгс [13].

Принято, что отношение количества окислителя к количеству топлива в процессе сжигания или в горючей смеси топливо–окислитель измеряют либо в виде отношения масс, либо в отношении объемов, либо в отношении количества молей [13, 14]. Соответственно, различают массовое L_0 , объемное L_v и молярное L_M отношения:

$$L_0 = m_o / m_f, L_v = V_o / V_f, L_M = M_o / M_f.$$

где m_o , m_f – массы окислителя и топлива; V_o , V_f – объемы окислителя и топлива; M_o , M_f – молярное количество окислителя и топлива (число молей).

Рассуждения строим с соотношением $L_0 = m_o / m_f$, L_0 – отношение количества окислителя к количеству топлива в процессе сжигания, как коэффици-

ент избытка воздуха $\alpha=1=4,41$ г/1 г. То есть полученный коэффициент α делим на 4,41.

Тогда m_o – масса окислителя, г. Принимаем 4,41 г (это 3,6 л); m_f – масса топлива, г. Принимаем 1,0 г (это 1000 мг). Имеем, что при зажигании навески в 1000 мг необходим реакционный объем в 3,6 л. В этом случае коэффициент избытка воздуха $\alpha=1$. Или на 1 г угля нужно 4,41 г воздуха. Строим таблицу расчетных соотношений коэффициента избытка воздуха для экспериментальной установки с объемом реакционной камеры 4,5 л, принимая среднюю плотность угля 1300 кг/м³ (табл. 1) или 1,3 кг/л, или 1,3 г/см³, и массу одного литра воздуха 1,225 г. В данном случае варьируем массовым содержанием угля, а не воздуха.

Таблица 1. Расчетные соотношения коэффициента избытка воздуха для экспериментальной установки с объемом реакционной камеры 4,5 л и средней плотности угля 1300 кг/м³

Table 1. Calculated ratios of the air excess coefficient for an experimental setup with a reaction chamber volume of 4.5 l and an average coal density of 1300 kg/m³

Коэффициент избытка воздуха, α Excess air coefficient, α	Масса угля m_f , г Coal mass m_f , g	Характер топливной смеси Fuel mixture character
1,56	0,8	Бедная/Unenriched
1,39	0,9	
1,25	1,0	
1,14	1,1	
1,042	1,2	Стехиометрия Stoichiometry
0,96	1,3	Богатая/Enriched
0,89	1,4	
0,83	1,5	

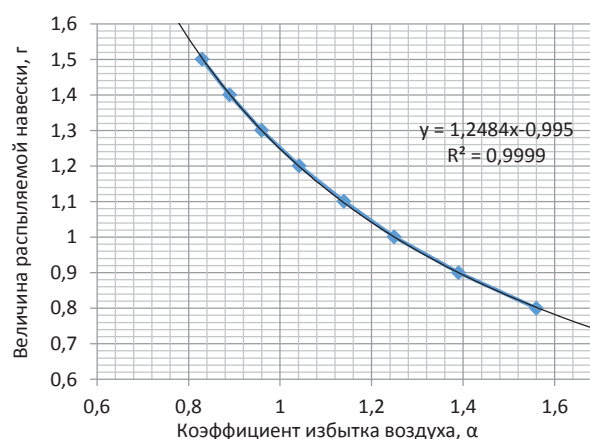


Рис. 1. График зависимости величины распыляемой навески в реакционном объеме 4,5 л от коэффициента избытка воздуха α при средней плотности угля 1300 кг/м³

Fig. 1. Graph of the dependence of the sprayed sample size in a reaction volume of 4.5 l on the air excess coefficient α at an average coal density of 1300 kg/m³

По полученным данным (табл. 1) строим график зависимости величины распыляемой навески в реакционном объеме от коэффициента избытка воздуха α .

Полученная зависимость позволяет отображать прогнозные величины коэффициента избытка воздуха α , согласованные с экспериментальными данными горения аэровзвесей угольной пыли. Далее проведем анализ полученных результатов на экспериментальном стенде.

Графическое отображение процесса горения аэровзвесей

При анализе полученных видеофайлов горения аэровзвесей возникла необходимость разработки методологии анализа видеофайлов воспламенения аэровзвесей в виде графического отображения процесса горения. Это позволяет более четко фиксировать время индукции процесса зажигания, длительность и характер горения, а также отображать параметрические характеристики пламени. Что позволит обосновано выбрать как температуру зажигания факела, так и другие параметры.

Известно, что время пребывания частицы в топке составляет 1–3 с. При факельном сжигании твердого топлива применяют пыль тонкого помола с размером частиц от 50–60 мкм (антрацит, тощие угли) до 150–200 мкм (бурые угли, торф) [8]. Как видно, оптимальный размер частиц тем меньше, чем меньше выход летучих веществ.

Для подсушки топлива, повышения температурного уровня в топке и интенсификации процесса сжигания применяют подогрев воздуха, идущего на горение. При сжигании высоковлажных бурых углей, а также антрацита и тощих углей воздух подогревают до 350–400 °С. При сжигании сухих каменных углей – до 250–300 °С [8, 9]. Эти характеристики учитываются при выборе вида топки.

Авторы [11, 12] пытались оценить время горения газовой фазы при факельном распылении и время горения твердой частицы. Они оказались не сопоставимы. Выяснилось, что частичка угля диаметром 100–200 мкм за время проведения опыта успевает только выделить летучие компоненты. Оставшаяся твердая фаза, представляющая собой коксовый остаток, не успевает сгореть за 0,5 с.

Согласно [7, 14], горение летучих происходит непосредственно вблизи поверхности твердой частицы, а выделяемая теплота влияет на ее прогрев и воспламенение. Следовательно, чем выше выход летучих веществ из частицы, тем лучше происходит ее подготовка к сжиганию [15].

В работах [7, 16] показано, что в зоне ядра факела диффузионные процессы являются определяющими и это является основанием при формировании пылеугольных облаков для изучения процесса

горения в условиях максимума диффузионных процессов в реакционном объеме и минимума турбулентного влияния. Что и положено в основу экспериментального устройства авторов, усовершенствовавших идею предшественников [11, 12].

При переходе материального потока из зоны ядра факела в зону догорания и охлаждения происходит изменение как кинетических, так и диффузионных условий горения [8, 16]. Константа скорости химической реакции k уменьшается вследствие понижения температуры, а коэффициент диффузионного массообмена α_d – вследствие уменьшения турбулентности газового потока [13, 14]. В зависимости от конкретных условий в зоне дожигания и охлаждения могут наблюдаться различные условия реагирования [7].

В остальной части топочного пространства в условиях снижения концентрации горючего и окислителя, повышения количества продуктов горения и слабой турбулизации материального потока происходит догорание угольных частиц. В этой зоне создается такой аэродинамический режим, который позволяет повысить интенсивность горения, распространяя его на весь объем топочной камеры [8].

В зоне ядра факела горение протекает при высокой температуре (1400–1600 °С) [8]. Кинетическое уравнение гетерогенного горения частицы кокса имеет вид [13]

$$W = Co_2^0 / (1/\alpha_d + 1/k),$$

где W – скорость реакции гетерогенного горения (количество кислорода, потребляемое единицей реакционной поверхности за единицу времени), моль/(м²·с); Co_2^0 – концентрация кислорода в объеме, окружающем частицу, моль/м³; α_d – коэффициент диффузионного массообмена, м²/с; k – константа скорости химической реакции, м²/с.

Константа скорости химической реакции, имеющая экспоненциальную зависимость от температуры, при высокой температуре в зоне ядра факела горения, достигающей 1400–1600 °С, приобретает очень высокое значение [13]. В этой же зоне вследствие высокой концентрации горючего и окислителя и повышенной турбулизации потока коэффициент диффузионного массообмена α_d также будет максимальным [7, 17]. С учетом низкой относительной скорости движения частиц в потоке его абсолютная величина будет сравнительно невелика и $\alpha_d \gg k$. Следовательно, диффузионные процессы в зоне ядра факела являются определяющими для горения пылеугольного факела.

Рассматривая зону догорания и охлаждения как последующую зону ядра факела, можно наблюдать изменение как кинетических, так и диффузионных условий горения. Поэтому могут наблюдаться и различные условия реагирования [17].

Таблица 2. Схема горения угольной пыли в топочной камере

Table 2. Scheme of coal dust combustion in the combustion chamber

Зона подготовки топлива и воздуха Fuel and air preparation area	Горелочное устройство Burner device	Объем топочной камеры с горящим факелом. Частица в зоне горения пребывает 1–3 с. Volume of the combustion chamber with a burning torch. The particle remains in the combustion zone for 1–3 s.		
		Начальный участок Initial section	Зона ядра горения Combustion core zone	Зона догорания и охлаждения Afterburning and cooling zone
Размол, нагрев воздуха Grinding, heating of air Тонкий помол от 50–60 мкм (антрацит, тощие угли) до 150–200 мкм (бурые угли, торф) Fine grinding from 50–60 microns (anthracite, lean coals) to 150–200 microns (brown coals, peat)	Прогрев топлива до 350–400 °С (антрацит, тощие угли) до 250–300 °С (бурые угли и торф) Heating the fuel to 350–400 °С (anthracite, lean coals) to 250–300 °С (brown coals and peat) Смешение, концентрация пыли в факеле, 20–30 г в 1 м ³ Mixing, dust concentration in the torch, 20–30 g in 1 m ³	Протяженность Length 0,6–1 м Инициирование процесса горения Combustion initiation	20–30 % объема топочной камеры 20–30% of the combustion chamber volume Сгорание топлива Fuel combustion Выделение 85–90 % теплоты топлива Release of 85–90% of fuel heat Температура 1400–1600 °С Temperature 1400–1600 °С	Происходит изменение как кинетических, так и диффузионных условий горения There is a change in both kinetic and diffusion conditions of combustion Турбулентность во всем объеме топочной камеры Turbulence throughout the entire combustion chamber Происходит догорание частиц кокса Coke particles are burning out Температура газов в зоне догорания понижается Temperature of gases in the combustion zone decreases
Индикаторы горения Burning indicators		0,5; 3; 5;	4; 5; 6;	2; 3; 4; 5; 0,5; 0;

Для эффективного сжигания топлива большое значение имеет время индукции процесса зажигания частиц топлива. С целью обоснования индикаторов интенсивности горения аэровзвеси угольной пыли в реакционном объеме от времени протекания процесса с опорой на характеристики горения угольной пыли рассмотрим этапы горения угольной пыли в топочной камере (табл. 2).

Основываясь на опыте многолетних наблюдений процессов горения аэровзвесей на установке определения критических условий [11, 12] и руководствуясь методическими указаниями [18], предлагается для оценки уровня интенсивности горения аэровзвесей в реакционном объеме ввести оценочную индикаторную шкалу распространения фронта горения. Данная шкала представлена в табл. 3.

Данная шкала применяется при оценке кадров видеофайлов горения аэровзвеси. При анализе кадров им присваивается величина индикатора уровня интенсивности горения. Время определяется по таймеру видеофайла.

По полученным данным строим зависимость интенсивности взрывного горения аэровзвеси (рис. 2) в реакционном объеме от времени протекания процесса на примере горения угля марки Д фракции до 100 мкм.

Угольная пыль отличается полифракционным составом с частицами различных размеров [19, 20]. Горение угольных частиц в факеле начинается с мелких фракций. Выделяемая при этом теплота

ускоряет прогрев более крупных фракций, но их горение завершается в зоне, где значительная часть кислорода уже израсходована [7, 21]. Поэтому горение крупных фракций сопровождается потерями теплоты от механического недожога частиц кокса, уносимых из топки дымовыми газами.

Образцом для исследования служил уголь марки Д. Проведем анализ интенсивности взрывного горения аэровзвеси угля в реакционном объеме.



Рис. 2. Зависимость интенсивности взрывного горения аэровзвеси в реакционном объеме от времени протекания процесса

Fig. 2. Dependence of the intensity of air suspension explosive combustion in the reaction volume on the time of the process

Таблица 3. Индикаторная шкала уровня интенсивности горения аэровзвеси в реакционном объеме

Table 3. Indicator scale of the combustion intensity level of airborne particles in the reaction volume

Величина индикатора уровня интенсивности горения, I Value of the combustion intensity level indicator, I	Описание характера горения в экспериментальном объеме Description of the combustion nature in the experimental volume	Вид горения аэровзвеси в реакционном объеме Type of air suspension combustion in the reaction volume
0	Запуск экспериментального процесса Launch of the experimental process	
	Горения не наблюдается No combustion is observed	
0,5	Инициирование процесса горения в реакционной камере Combustion initiation in the reaction chamber	
	Гашение пламени в реакционном сосуде после завершения горения Extinguishing the flame in the reaction vessel after combustion is complete	
1	Горение в зоне источника зажигания, облако горения, не превышающее 7 см от источника зажигания. Холодное пламя: начало горения; при завершении горения Combustion in the ignition source zone, combustion cloud not exceeding 7 cm from the ignition source. Cold flame: beginning of combustion; at the end of combustion	
2	Дробление фронта пламени. Очаговое холоднопламенное горение. Наблюдаются: дробление, не перерастающее во взрыв; дробление, перерастающее во взрыв Flame front fragmentation. Focal cold flame combustion. Observed: fragmentation that does not develop into an explosion; fragmentation that develops into an explosion	
3	Распространение фронта горения на 2/3 объема реакционного сосуда. Холодное пламя. Наблюдаются: развитие горячего пламени; развитие холодного пламени; стадия завершения горения Spread of combustion front over 2/3 of the reaction vessel volume. Cold flame. Observed: development of hot flame; development of cold flame; stage of combustion completion	
4	Фронт пламени носит очаговый характер горения по всему объему реакционного сосуда без роста давления. Холодное пламя Flame front has a focal combustion character throughout the entire volume of the reaction vessel without pressure increase. Cold flame	
5	Распространение фронта горения по всему объему реакционного сосуда без роста давления. Холодное пламя Spread of combustion front throughout the entire volume of the reaction vessel without pressure increase. Cold flame	
6	Распространение фронта горения по всему объему реакционного сосуда с ростом давления Spread of the combustion front throughout the entire volume of the reaction vessel with increasing pressure	

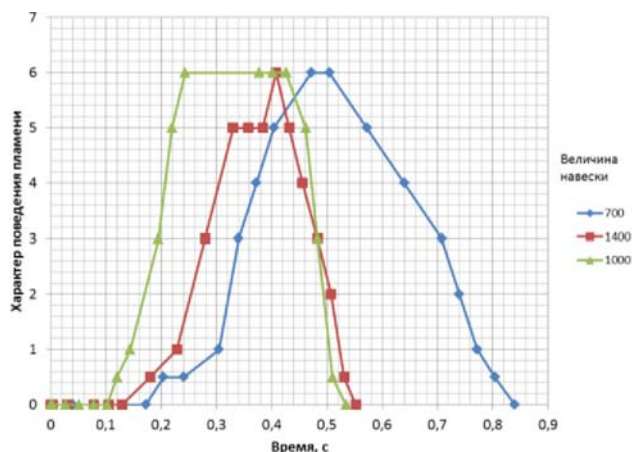


Рис. 3. Зависимость интенсивности взрывного горения аэровзвеси угля в реакционном объеме от времени протекания процесса и величины навески

Fig. 3. Dependence of the intensity of coal air suspension explosive combustion in the reaction volume on the process duration and the sample size

Горение навески 1400 мг

Анализ процесса горения аэровзвеси (рис. 3, красная линия) показывает, что в эксперименте зафиксирован процесс перехода холоднопламенного горения в горячий.

Мы наблюдаем динамично и быстро развивающийся процесс с временем индукции 0,12 с, проходящий фазу воспламенения и развития горения за 0,18 с. Развитие холоднопламенного горения происходит за 0,1 с и с его протяженностью в 0,05 с. Затем кратковременно горение переходит в горячий режим протяженностью в 0,05 с. В этот период не наблюдается очагового горения, характеризующего наличие диффузионных процессов. Процесс завершения и прекращения горения составляет 0,1 с. Полное время горения составляет 0,35 с.

Коэффициент избытка воздуха α в данных условиях проведения опытов, согласно рис. 1, составляет 0,89. Это говорит о том, что смесь сильно богата топливом, горение осуществляется в режиме недостатка окислителя.

Горение навески 1000 мг

Анализируя горение навески в 1000 мг, можно сделать вывод, что горение осуществляется исключительно в газовой фазе. Продолжительность горения аэровзвеси составляет 0,43 с. Наблюдается динамично и быстро развивающийся процесс с временем индукции 0,1 с, проходящий фазу воспламенения и развития горения за 0,12 с. Затем горение переходит в горячий режим с удержанием высокой температуры протяженностью в 0,19 с. В рассматриваемый период не наблюдается очагового горения, характеризующего наличие диффузионных процессов. Процесс завершения и прекращения

горения составляет 0,08 с, из которого на холоднопламенное горение отводится 0,03 с.

Коэффициент избытка воздуха α в данных условиях проведения опытов, согласно рис. 1, составляет 1,25. Это говорит о том, что топливная смесь находится в близком соотношении к стехиометрии топлива и окислителя, горение осуществляется в наиболее благоприятном режиме.

Горение навески 700 мг

При горении аэровзвеси массой 700 мг мы наблюдаем процесс перехода холоднопламенного горения в горячий. Продолжительность горения аэровзвеси составляет 0,47 с, а время индукции — 0,17 с, что говорит о большом избытке окислителя. По истечении 0,2 с происходит зажигание пылевого облака и еще 0,04 с идет его развитие, в это время накапливаются продукты пиролиза и еще 0,06 с наблюдается горение в области источника зажигания. Затем мы наблюдаем распространение пламени по всему объему за 0,17 с, это холоднопламенное горение. Оно поднимается до уровня 6 по индикатору интенсивности горения, но протекает без роста давления, что характеризуется низким уровнем термохимических реакций, протекающих в реакционном объеме, а большие тепловые потери во фронте пламени не дают возможности развития очага горения.

Коэффициент избытка воздуха α в данных условиях, согласно рис. 1, составляет более 1,6. В смеси топлива и окислителя значительный избыток окислителя, горение осуществляется в наиболее неблагоприятном режиме для топливных агрегатов. Это режимы определения концентрационных пределов взрываемости пылеобразующих материалов.

Анализируя данные, представленные на рис. 3, мы видим, что лучше всех горит пылевое облако с количеством твердой фазы в 1000 мг. Это может говорить о следующем:

- в газопылевом облаке пылевые частицы равномерно распределились по всему объему, система состоит из оптимального соотношения горючее–окислитель, α составляет 1,25. Согласно [7, 11, 12, 14, 16, 21, 22], мы имеем устойчивое и эффективное горение топливной системы;
- в процессе горения наблюдается минимальное время деструктивных процессов, происходящих в угольных частицах, что говорит об эффективном тепломассопереносе;
- конвективные потоки в реакционной камере не разрывают формирующийся фронт горения;
- окислительные реакции в топливной системе протекают в более короткое время;
- термический баланс системы характеризуется ростом давления взрыва, что и наблюдалось в работе [23, 24].

Если все время процесса горения определилось как 0,43 с, то активная фаза горения составила 0,18 с, а если к характеру поведения пламени отнести и индикатор 5 уровня, то время горения составит 0,24 с, что на 0,19 с больше времени процесса подготовки и завершения горения. Этот анализ убеждает нас во взрывном режиме горения системы, которое условно относится к горячим пламенам [7, 11, 12, 14, 16, 21, 22].

Другие концентрации (1400 и 700) горят в пределах холоднопламенного горения с отклонениями по задержке горения и суммарной тепловой производительности. Следует полагать, что данные условия являются оптимальными для сжигания угля этой марки.

Заключение

Разработанный метод оценки и прогнозирования некоторых показателей углей и углеотходов, полученных на основе методологии анализа ви-

деофайлов воспламенения аэрозвеси в виде графической визуализации процесса горения, показал свою эффективность. Он показал хорошее распределение по всему объему пылеугольных частиц в газопылевом облаке, демонстрируя устойчивое и эффективное горение топливной системы. Конвективные потоки в реакционной камере не разрывают формирующийся фронт горения.

Графическая визуализация процесса горения показала, что в процессе горения наблюдается минимальное время деструктивных процессов, происходящих в угольных частицах, что говорит об эффективном тепломассопереносе. Для исследуемой системы Кузнецкого угля марки Д оптимальное соотношения горючее–окислитель α составляет 1,25. Окислительные реакции в этом случае протекают в более короткое время, что характеризуется ростом давления в реакционном объеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
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. Role of biomass as low-carbon energy source in the era of net zero emissions / Changwon Yang, Hyunmin Kwon, Byeongryeol Bang, Soohwa Jeong, Uendo Lee // *Fuel*. – 2022. – Vol. 328. – P. 125206. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125206
4. 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
5. ГОСТ 17070-2014 Угли. Термины и определения. Технические требования. Введ. 2016-04-01 – М.: Стандартинформ, 2015. – 29 с.
6. Копань А.В., Клейнерман В.А. Тестирование технических решений по топочно-горелочным устройствам в составе низкокиссионной системы сжигания кузнецкого угля // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 140–147. DOI: 10.18799/24131830/2021/4/3157
7. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе – М.: Наука. 1980. – 478 с.
8. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. 4-е изд., репр. – М.: Бастет, 2009. – 528 с.
9. СП 89.13330.2016. Свод правил. Котельные установки. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054199> (дата обращения 10.01.2025).
10. Effect of excess air ratio and spark timing on the combustion and emission characteristics of turbulent jet ignition direct injection hydrogen engine / Yanfei Qiang, Shihao Zhao, Jinxing Yang, Jichun Cai, Fangxu Su, Shuofeng Wang, Changwei Ji // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 9. – P. 1166–1178. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.052
11. 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.
12. Patrakov Y.F., Sechin A.I., Sechin A.A., Experimental range test of flame spread in dust-air mixtures // *Journal of Mining Science*. – 2019. – № 55. – P. 494–498. DOI: 10.1134/S106273911903582X
13. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. 2 изд. – М.; Л.: Химия, 1964. – Т. 3. – 740 с.
14. Семенов Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов // *Теория горения и взрыва*. – М.: Наука, 1981. – С. 33–140.
15. Совместное измельчение как фактор синергии при совместном обжиге. Тематическое исследование древесно-угольных смесей / А.Г. Матвеева, Ю.Ф. Патраков, А.И. Сечин и др. // *Преобразование углеродных ресурсов*. – 2023. – Т. 6. – изд. 1. – С. 51–57. DOI: 10.1016/j.crcon.2022.11.001
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. Производство и использование водоугольного топлива / В.Е. Зайденварг, К.Н. Трубецкой, В.И. Мурко, И.Х. Нехороший. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – 176 с.
18. ГОСТ 12.1.044-89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 144 с.

19. Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. – М.: Горное дело, 2011. – 256 с.
20. 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. DOI: 10.31857/S000233102301003X
21. Кумаган С. Горение / пер. С.К. Орджоникидзе, Б.С. Ермолаев. – М.: Химия, 1979. – 255 с.
22. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967. – 491 с.
23. Зависимость между величиной воспламенения пневмоподвески и размером реакционной камеры / А.И. Сечин, А.А. Сечин, Ю.Ф. Патраков и др. // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. 14-й Международный форум по стратегическим технологиям (IFOST 2019). – 2021. – Т. 1019. – 012039, 6 с. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012039
24. Riaz J., Gibbins J., Chalmers H. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass// Fuel. – 2017. – № 202. – P. 650–655. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.04.011

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. yurat52@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. mezenцева@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: 17.01.2025

Поступила после рецензирования: 28.01.2025

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. 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
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. Changwon Yang, Hyunmin Kwon, Byeongryeol Bang, Soohwa Jeong, Uendo Lee. Role of biomass as low-carbon energy source in the era of net zero emissions. *Fuel*, 2022, vol. 328, pp. 125206. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125206
4. 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
5. SS 17070-2014 *Coals. Terms and definitions. Technical requirements. Intro*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 29 p. (In Russ.)
6. 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
7. 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.)
8. Sidelkovskiy L.N. *Boiler installations of industrial enterprises*. Moscow, Bastet Publ., 2009. 528 p. (In Russ.)
9. SP 89.13330.2016. *Code of Practice. Boiler Installations*. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456054199> (accessed 10 January 2025).
10. Yanfei Qiang, Shihao Zhao, Jinxing Yang, Jichun Cai, Fangxu Su, Shuofeng Wang, Changwei Ji. Effect of excess air ratio and spark timing on the combustion and emission characteristics of turbulent jet ignition direct injection hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 9, pp. 1166–1178. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.052
11. 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.)
12. 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
13. *Chemist's Handbook*. Ed. by B.P. Nikolsky Moscow, Khimiya Publ., 1964. 740 p. (In Russ.)

14. Semenov N.N. Thermal theory of combustion and explosions. *Theory of combustion and explosion*. Moscow, Nauka Publ., 1981. pp. 33–140. (In Russ.)
15. Matveeva A.G., Patrakov Yu.F., Sechin A.I. Co-milling as a synergy factor for co-firing. A case study of wood/coal blends. *Carbon Resources Conversion*, 2023, vol. 6, Iss. 1, pp. 51–57. (In Russ.) DOI: 10.1016/j.crcon.2022.11.001
16. Heidon A.G., Wolfhard H.G. *Flame, its structure, radiation and temperature*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1959. 333 p. (In Russ.)
17. Zaidenvarg V.E., Trubetskoy K.N., Murko V.I., Nekhoroshy I.Kh. *Production and use of water-coal fuel*. Moscow, Academy of Mining Sciences Publ. House, 2001. 176 p. (In Russ.)
18. 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.)
19. Romanchenko S.B., Rudenko Yu.F., Kosterenko V.N. *Dust dynamics in coal mines*. Moscow, Mining Publ., 2011. 256 p. (In Russ.)
20. Boyko E.A., Strashnikov A.V. Justification of practical recommendations for organizing optimal modes of preliminary thermal treatment and combustion of coal in a pulverized state. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2022, vol. 1, pp. 35–50. DOI: 10.31857/S000233102301003X (In Russ.)
21. Kumagai S. *Combustion*. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 255 p. (In Russ.)
22. Frank-Kamenetsky D.A. *Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. Moscow, Nauka publ., 1967. 491 p. (In Russ.)
23. Sechin A.I., Sechin A.A., Patrakov Yu.F. The dependence between the ignition value of air suspension and the size of the reaction chamber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1019, pp. 6. (In Russ.) DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012039
24. Riza 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

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., 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. mezentseva@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: 17.01.2025

Revised: 28.01.2025

Accepted: 03.02.2025