

Выбор оптических датчиков пламени для автоматических систем взрывозащиты на основе радиационного анализа взрывоопасных метановоздушных и пылевоздушных смесей

С.В. ХОХЛОВ ✉, З.А. АБИЕВ и В.А. МАККОЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ khokhlov_sv@pers.spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Khokhlov, S.; Abiev, Z.; Makkoev, V. The Choice of Optical Flame Detectors for Automatic Explosion Containment Systems Based on the Results of Explosion Radiation Analysis of Methane- and Dust-Air Mixtures. *Appl. Sci.* 2022, 12, 1515. <https://doi.org/10.3390/app12031515>

Аннотация: Обзор существующих оптико-электронных приборов контроля показал, что при проектировании оптико-электронных детекторов рудничной атмосферы недостаточно учитывается фактор внешних оптических помех. К ним относится любой посторонний источник теплового излучения: источник искусственного освещения или предприятие. Как следствие, системы безопасности на основе оптико-электронных детекторов, устанавливаемые в настоящее время на горнодобывающих объектах, не способны в должной мере обеспечить обнаружение источника зажигания при наличии оптических помех. Таким образом, необходимо определить рабочие спектральные диапазоны длин волн от взрывов метана и угольной пыли. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, посвященных спектральному анализу взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли с помощью фотоэлектрического метода. Воспламенение метановоздушной смеси стехиометрической концентрации (9,5 %) и угольной пыли размером, характеризующимся дисперсностью 63–94 мкм и концентрацией 200 г/м³, проводилось в сферической камере объемом 20 л с начальной температурой в установке 18–22°C при атмосферном давлении. Затем проводилась фотометрия светового потока взрыва на фотоэлектрической установке. Были определены рабочие спектральные диапазоны длин волн от взрывов метана и угольной пыли. Для метановоздушной смеси целесообразно использовать участки спектра с максимумом излучения 390 и 900 нм. Для пылевоздушной смеси достаточно участка спектра с максимумом излучения 620 нм. Это позволило выбрать диапазоны длин волн для пусковых ориентиров автоматических систем взрывоподавления. Это исключит ложное срабатывание системы взрывоподавления от других источников излучения. Результаты исследования помогут повысить достоверность принятия решений при непосредственном проектировании прибора. Полученные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях при разработке помехоустойчивых оптических датчиков обнаружения пламени с высокой скоростью срабатывания.

Ключевые слова: взрыв; угольная пыль; метан; подавление взрыва; спектральные характеристики; давление взрыва; интенсивность излучения; свободные радикалы.

The Choice of Optical Flame Detectors for Automatic Explosion Containment Systems Based on the Results of Explosion Radiation Analysis of Methane- and Dust-Air Mixtures

Sergey V. KHOKHLOV ✉, Zaur A. ABIEV and Viacheslav A. MAKKOEV

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ khokhlov_sv@pers.spmi.ru

Abstract: A review of the existing optoelectron monitoring devices revealed that the design of optoelectron detectors of the mine atmosphere does not sufficiently take into account the factor of external optical interference. This includes any extraneous source of thermal emission: a source of artificial lighting or enterprises. As a consequence, the optoelectron detectors -based safety systems currently installed at mining sites are not able to ensure properly the detection of the ignition source in the presence of optical interference. Thus, it is necessary to determine the working spectral wavelength ranges from methane and coal dust explosions. The article presents the results of experimental research devoted to the methane-air mixture and coal dust explosion spectral analysis by means of the photoelectric method. The ignition of a methane-air mixture of stoichiometric concentration (9.5 %) and coal dust of size characterized by the dispersion of 63–94 microns and concentration of 200 g/m³ was carried out in a 20 L spherical chamber with an initial temperature in the setup of 18–22 °C at atmospheric pressure. Then, photometry of the explosion light flux was conducted on a photoelectric unit. Operating spectral wavelength ranges from methane and coal dust explosions were determined. For the methane-air mixture, it is advisable to use the spectral regions at the maximum emission of 390 and 900 nm. The spectrum section at the maximum emission of 620 nm was sufficient for dust-air mixture. It enabled us to select the wavelength ranges for automatic explosion suppression systems' launching references. This will exclude false triggering of the explosion suppression system from other radiation sources. The research results will help to improve the decision-making credibility of the device in its direct design. The results will be used in further research to design noise-resistant optical flame detection sensors with a high response rate.

Keywords: explosion; coal dust; methane; explosion suppression; spectral characteristics; explosion pressure; radiation intensity; free radicals.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

1. Введение

Пылевые и газовые взрывы являются одними из самых больших катастроф в угольной промышленности и связаны с массовыми смертельными случаями. Это опасность для всей горнодобывающей промышленности, а не только для угледобычи [1]. В связи с этим повышение безопасности при взрывных работах в газовых и пыльных шахтах имеет первостепенное значение [2]. Повышение безопасности пылегазометановых взрывов возможно только при комплексном подходе, включающем управление рисками [3-5], разработку средств и методов взрывозащиты шахт, контроль выбросов метана [6], мониторинг технологических процессов подземной разработки угольных месторождений [7-10].

К числу эффективных способов борьбы с возможными взрывами относятся автоматические системы предотвращения воспламенения. Датчики, применяемые в автоматических барьерах взрывозащиты, реагируют на высокое давление (наружные штанги) и температуру, аномальные концентрации взрывоопасных газов, оптические параметры и пламя [11]. Недостатком датчиков, реагирующих на давление взрывной волны, является возможность их срабатывания из-за посторонних акустических сигналов. Авторы работы [12] объясняют неэффективность внешних стержней тем, что их пространственно-временные параметры недостаточны для успешного удержания взрыва. Недостатком датчиков, реагирующих на изменение температуры, является их чувствительность к пыльной шахтной среде, отложениям пыли и т.д. [13]. Поскольку процесс воспламенения включает в себя освещение, идеальным решением являются оптические датчики, фиксирующие динамику в инфракрасном и ультрафиолетовом излучении и способные запустить автоматическую систему предотвращения во избежание возгорания и взрыва метанопылевоздушной смеси.

Первое, что мы учитываем при оценке рисков производственного травматизма, – это воздушная ударная волна, возникающая при взрыве метанопылевоздушной смеси [9]. Поэтому очевидно, что эффективная система подавления должна быть запущена на самых ранних стадиях воспламенения [14-16]. По этой причине спектральный отклик оптического датчика должен быть достаточным для запуска системы подавления.

Существует один метод [17,18] измерения температуры объекта без участия известного излучения. Однако этот метод неэффективен из-за медленного отклика, связанного с необходимостью анализа и обработки широкого диапазона оптического спектра [19]. В связи с этим правильный выбор оптического датчика невозможен без учета конкретного спектра излучения пламени и метанопылевоздушного взрыва.

Для использования в системах обнаружения и локализации пожара предложен ряд оптико-электронных приборов (ОЭП), в том числе два оптико-электронных прибора со спектральным соотношением. Прибор использует излучение в трех спектральных диапазонах (750 ± 40 нм, 950 ± 50 нм, 1550 ± 12 нм). Однако в исследовании не приводится критерий выбора этих диапазонов [20].

Кроме того, для правильного тушения в пределах коэффициента развития с площадью поперечного сечения до 10 м^2 необходимо создать взрывоподавляющую среду, выбросив не менее 30 кг ингибитора за 15 мс. Такая скорость выброса в случае ложных срабатываний может быть опасна для людей, находящихся в непосредственной близости от взрывоподавляющих устройств [21].

Поэтому разработка конструкции и создание быстродействующего ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, нечувствительного к запыленности промежуточной атмосферы и обладающего высокой вероятностью обнаружения источника зажигания на ранней стадии при наличии внешних оптических помех, является актуальной научно-технической задачей. Она имеет существенное экономическое значение.

Таким образом, целью данного исследования является получение спектральных характеристик взрывного излучения горения и метановоздушных смесей для правильного выбора входных датчиков, применяемых в системах взрывоподавления.

2. Материалы и методы

Исследование спектра излучения пламени и спектра излучения взрыва метановоздушных и пылевых смесей проводилось фотоэлектрическим методом и было направлено на получение данных о характере распределения длин волн энергии излучения. Этот метод позволяет регистрировать спектр с автоматическим вычитанием темнового сигнала и калибровкой длины волны спектрографа [22, 23].

В настоящее время установлено [24,25], что излучение газа, нагретого ударной волной, соответствует излучению «серого тела» при условии, что относительное спектральное распределение энергии может быть практически отождествлено с любым распределением энергии «черного тела» при температуре T .

Спектрально-энергетическое распределение излучения, испускаемого «черным телом», описывается формулой Планка:

$$B_{\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda \cdot T} - 1}, \quad (1)$$

где B_{λ} – спектральная яркость излучающей поверхности, λ – длина волны излучения, C_1 и C_2 – константы, T – температура излучающей поверхности.

При условии, что $C_2/\lambda \cdot T \gg 1$, формула (1) сводится к классической формуле Вина, которая дает достаточно точное описание спектрального распределения энергии ударной волны для видимой области:

$$B_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}. \quad (2)$$

Формула (2) показывает, что для кривой, отражающей спектральное распределение энергии светящихся газов, являющихся серыми излучателями, необходимо обеспечить измерение их цветовой температуры.

Метод измерения цветовой температуры основан на сравнении силы света из двух областей спектра.

Используя уравнение (2), можно получить следующую формулу для энергии ΔE , излучаемой телом при температуре T , длине волны λ и в полосе пропускания $\Delta \lambda$:

$$\Delta E_{\lambda, T} = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \right) \Delta \lambda. \quad (3)$$

Если мы знаем $\Delta E_{\lambda, T}$ для различных длин волн λ_1 и λ_2 , то при наличии эталонного источника и температуры T_x легко вычислить температуру излучателя.

Имеем:

$$\Delta E_{1x} = \Delta E_{\lambda_1, T_x} = C_2 \lambda_1^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_1 T_x}} \Delta \lambda_1, \quad (4)$$

$$\Delta E_{2x} = \Delta E_{\lambda_2, T_x} = C_2 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 T_x}} \Delta \lambda_2. \quad (5)$$

Разделив уравнение (3) на уравнение (4) и взяв логарифмы, мы получим следующее выражение для исследуемого излучателя:

$$\ln \left(\frac{\Delta E_{1x}}{\Delta E_{2x}} \right) = -5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) + \ln \left(\frac{\Delta \lambda_1}{\Delta \lambda_2} \right) - \frac{C_2}{T_x} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (6)$$

и для эталонного источника:

$$\ln \left(\frac{\Delta E_{10}}{\Delta E_{20}} \right) = -5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) + \ln \left(\frac{\Delta \lambda_1}{\Delta \lambda_2} \right) - \frac{C_2}{T_0} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right). \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) мы получаем уравнение для расчета цветовой температуры источника T_x , используя имеющееся значение температуры эталонного излучателя T_0 :

$$\ln\left(\frac{\Delta E_{10}/\Delta E_{20}}{\Delta E_{1x}/\Delta E_{2x}}\right) = C_2\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0}\right). \quad (8)$$

Общий алгоритм лабораторного эксперимента следующий: в закрытой камере сгорания сферической взрывной камеры объемом 20 л [26-29], показанной на рис. 1, находится смесь стехиометрической концентрации, подаваемая одновременно путем сжатия под давлением 2 Мпа [30, 31]. Аварии в угольных шахтах в основном происходят из-за взрывов метана и угольной пыли [1, 32]. Именно эти два компонента и стали объектом исследования. Далее он сжигается с задержкой 60 мс. Начальная температура в установке составляет около 18-22°C при атмосферном давлении. Исследуемые образцы готовились методом парциального давления. Затем, перед воспламенением, смесь перемешивалась циркуляционным насосом для обеспечения ее однородности [33]. Светящийся поток, возникающий при воспламенении горючей смеси, наблюдался через смотровое окно взрывной камеры.

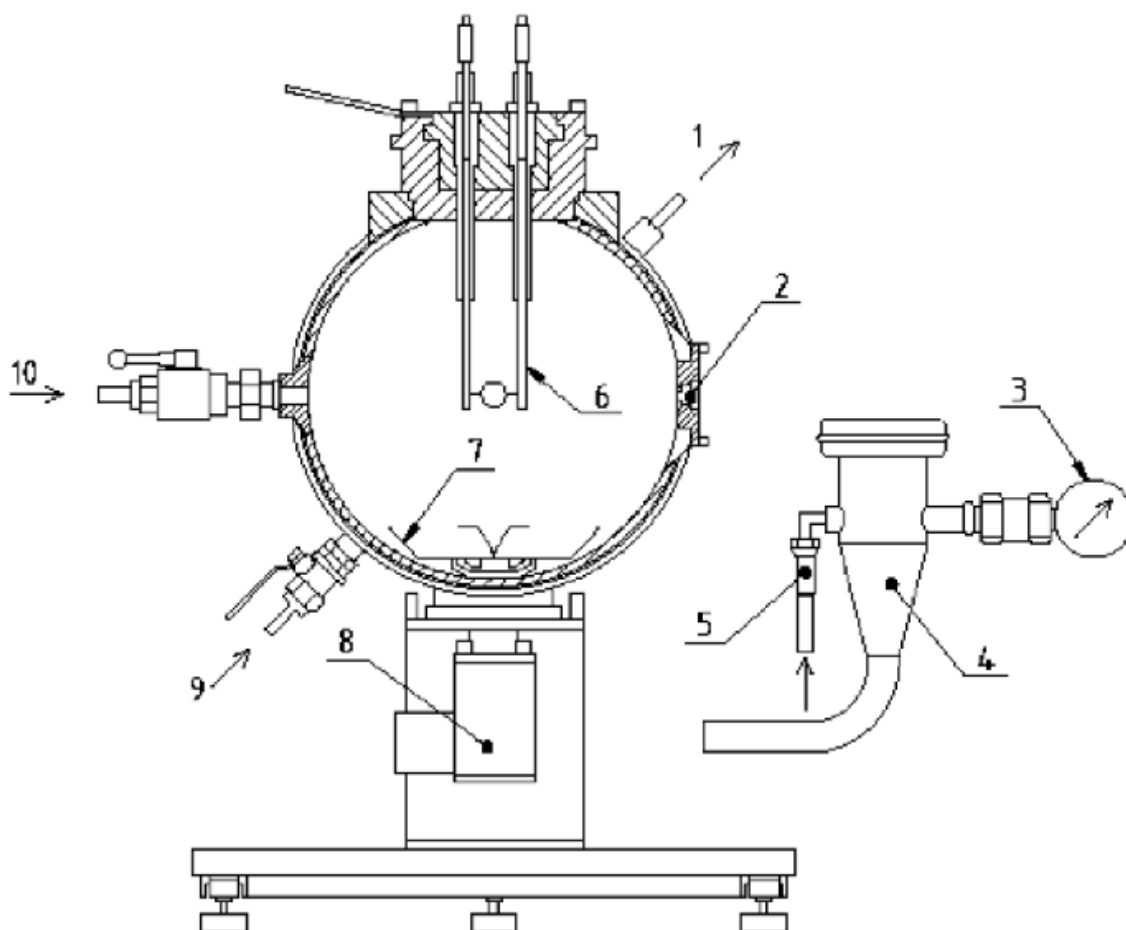


Рис. 1. Двадцатилитровая сферическая взрывная камера. Схема устройства.

1 – выход воды, 2 – датчик давления, 3 – манометр, 4 – пылесборник 0,6 дм³,

5 – воздухозаборник, источник зажигания, 6 – химические запальники, 7 – распылитель, 8 – клапан быстрого действия,

9 – забор воды, 10 – выход воздуха и результирующего вещества

Результаты воспламенения аэрозоля определенной концентрации, образовавшегося в камере, а также давление взрыва и скорость нарастания давления взрыва автоматически регистрируются системой обработки данных. Дальнейший анализ данных позволяет сделать вывод об успешном воспламенении смеси (рис. 2).

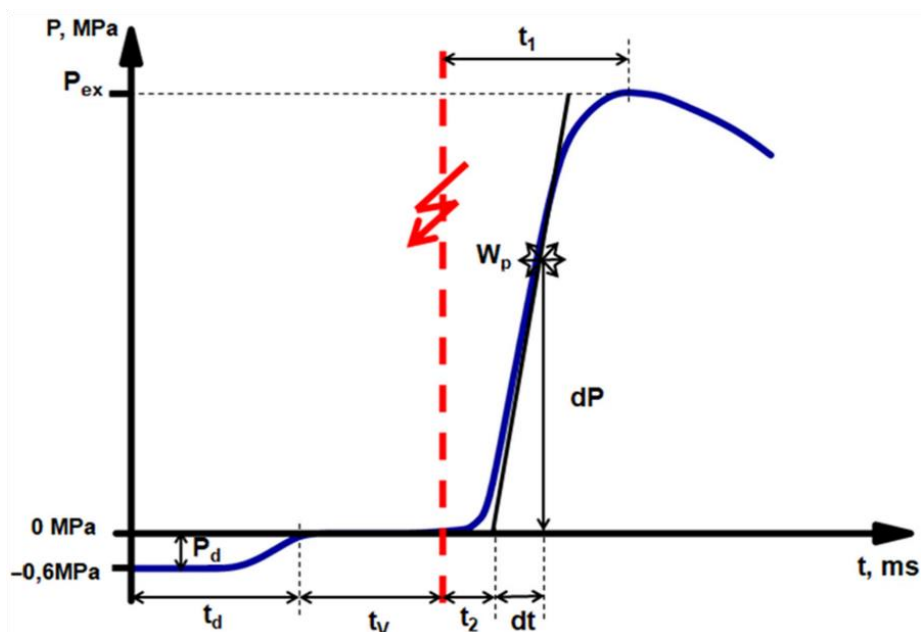


Рис. 2. Динамика изменения давления (P , МПа) за период (t , мс) сгорания пылегазовой смеси в камере взрыва:
 P_d – давление расширения камеры сгорания; P_{ex} – давление взрыва;
 t_d – задержка выпускного клапана; t_1 – время горения; t_2 – время вдувания; t_v – время задержки воспламенения;
 W_p – точка перелома на восходящем участке кривой давления; dP/dt – скорость нарастания давления при взрыве

Манометр со временем отклика 0,2 мс применяется для измерения давления до 2 МПа. Время регистрации данных давления и спектра излучения пламени от момента воспламенения контролировалось программой ExTest. Чтобы исключить влияние продуктов разложения химических воспламенителей на результаты испытаний, смесь воспламенялась от вспышки. Энергия электрического инициирования составляла 1 кДж. Фотометрическое измерение световых потоков, входящих в уравнение (8), проводилось с помощью фотоэлектрической установки (рис. 3).

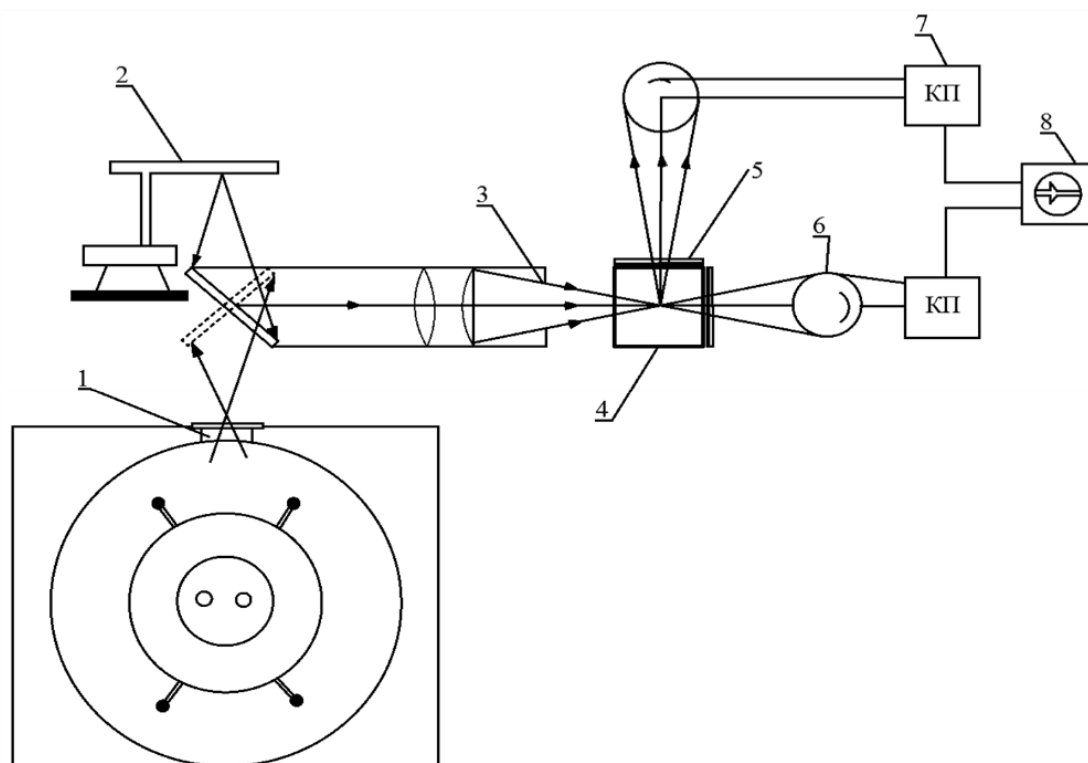


Рис. 3. Принципиальная схема измерения температуры. 1 – наблюдательное окно взрывной камеры, 2 – полосовая лампа, 3 – диафрагма, 4 – сплиттер, 5 – светофильтр, 6 – фотоувеличитель, 7 – катодный усилитель, 8 – осциллограф

Световой поток проецировался на входную диафрагму прибора с помощью вращающегося плоского зеркала и линзы. После прохождения через диафрагму световой поток регистрировался фотоумножителями с помощью системы разделения луча, сигналы которой записывались с экрана осциллографа. Разделение двух спектральных интервалов осуществлялось с помощью полосовых интерференционных фильтров с длиной волны 15 нм.

Калибровка регистрирующего устройства проводилась с помощью стандартной полосовой лампы накаливания. Ее световой поток проецировался на входную диафрагму прибора через отверстие во вращающемся диске (чоппере) с помощью вращающегося плоского зеркала и линзы.

Для измерения абсолютной интенсивности излучения использовались фотоумножители, питающиеся от высоковольтного выпрямителя с электронной регулировкой.

Для регистрации процессов излучения необходимо учитывать не только абсолютную чувствительность приемника, но и интервал длин волн, в котором эта чувствительность остается эффективной. Одним из основных параметров фотоприемников является их постоянная времени порядка 10^{-8} - 10^{-10} с.

Фотоумножители характеризуются значительным коэффициентом усиления фототока и хорошо защищены от помех, вызванных внешними электрическими полями. Относительно большой входной ток многокаскадного фотоумножителя позволяет регистрировать выходные сигналы каскадными осциллографами без применения специальных широкополосных усилителей.

Отклонения луча осциллографа пропорциональны энергии излучения в выбранных спектральных интервалах

$$D = \kappa \Delta E_1 \quad (9)$$

где D – отклонение луча осциллографа, а ΔE определяется по формуле (3). Используя уравнение (8), имеем:

$$\ln\left(\frac{D_{10}/D_{20}}{D_{1x}/D_{2x}}\right) = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0}\right) \quad (10)$$

Обозначим отношение сигналов свечения исследуемой среды для выбранных диапазонов спектра через α , а отношение калибровочных сигналов от эталонного источника при специальной цветовой температуре T – через β :

$$\alpha = D_{1x}/D_{2x} \quad (11)$$

$$\beta = D_{10}/D_{20} \quad (12)$$

Если мы подставим уравнения (11) и (12) в уравнение (10), то получим рабочую формулу для расчета температуры источника:

$$\ln(\beta/\alpha) = c_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0}\right) \quad (13)$$

Если температура эталонного источника хорошо известна, то погрешность измерения температуры рассчитывается по следующей формуле:

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{c_2(\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta \beta}{\beta}\right) \quad (14)$$

Погрешность измерений в основном обусловлена конечной толщиной луча осциллографа и шумами фотоэлектронного умножителя. Согласно расчетам, относительная погрешность не превышает 10 %.

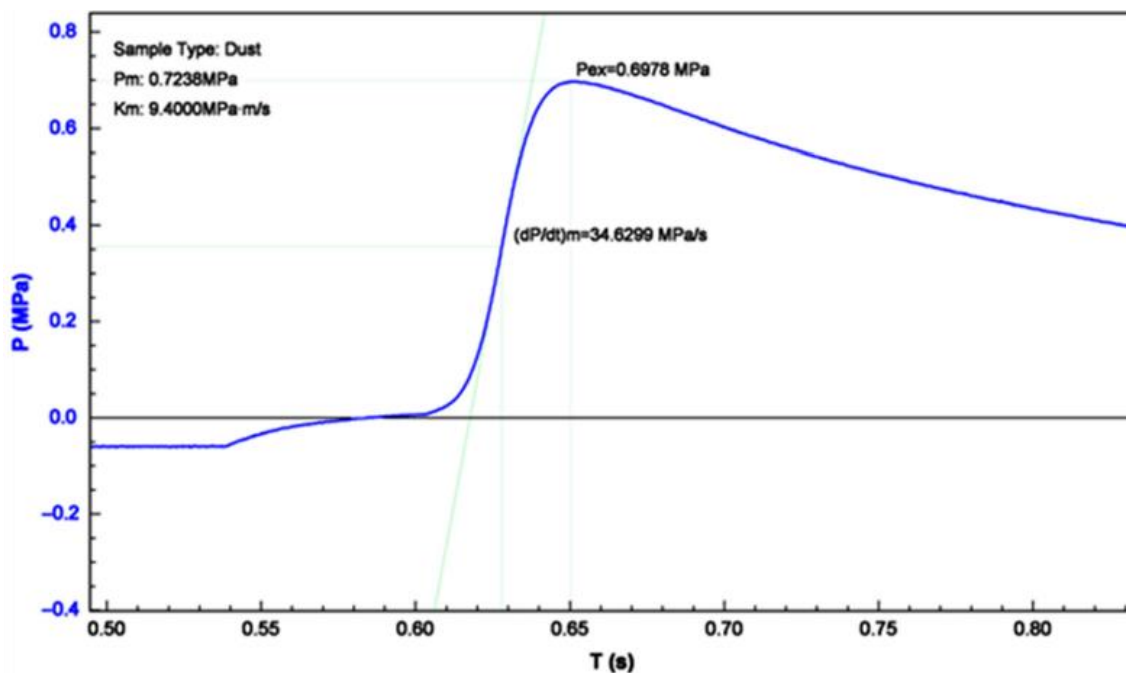
3. Результаты

Как показано на рис. 4а,б, оценка взрывоопасности смеси проводилась с учетом значений давления P_{\max} и скорости нарастания давления взрыва $(dP/dt)_{\max}$ [34]. Для отображения спектральных характеристик излучения регистрировалась и анализировалась интенсивность (I), как показано на рисунке 5. Параметр I_0 определяется как значение, при котором интенсивность излучения отклоняется от базовой линии (I_0 составляет 110 % от начальной интенсивности излучения) [35].

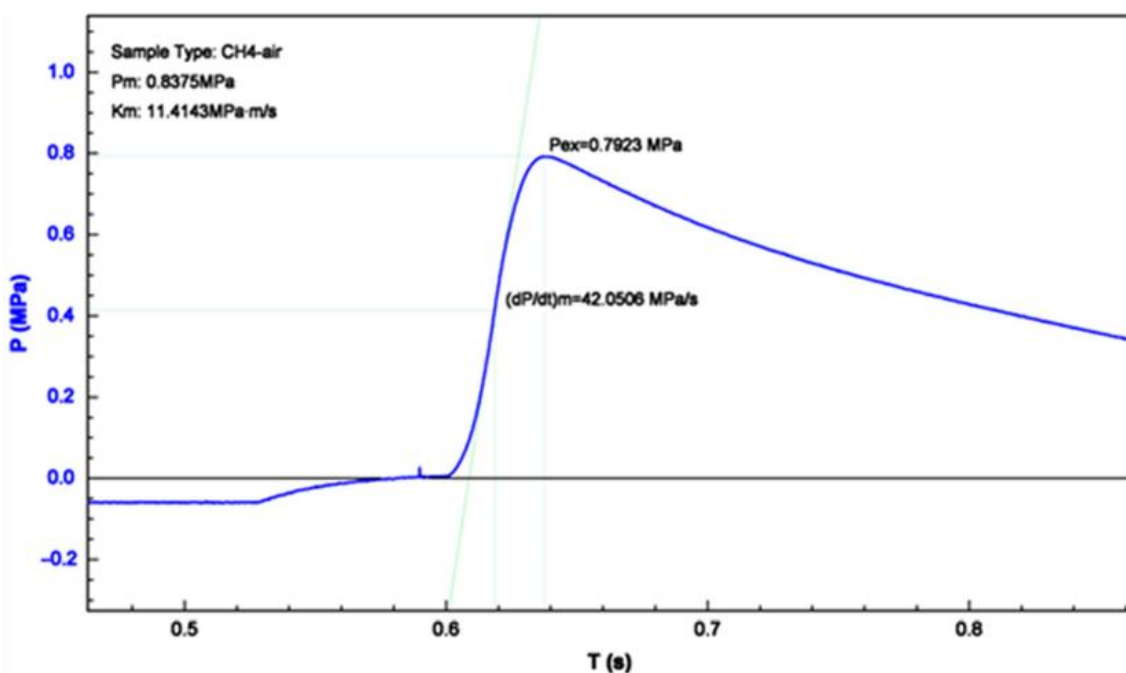
Параметр t_0 показывает время, необходимое для достижения максимального значения интенсивности излучения.

Согласно полученным экспериментальным данным, воспламенившийся метан стехиометрической концентрации в камере создавал максимальное давление взрыва $P_{\max} = 0,83$ МПа, а скорость нарастания давления составляла 42,05 МПа/с. При регистрации взрывного горения угольной пыли марки КС на участке шахты “Дзержинская” максимальное давление взрыва в камере составило 0,79 МПа, а скорость нарастания давления – 34,62 МПа/с.

Результаты анализировались с помощью прикладного программного обеспечения. По полученным данным были построены графики изменения давления взрыва метана и угольной пыли в зависимости от времени взрывного горения смеси.



(a)



(b)

Рис. 4. (а) Временная кривая давления по результатам зажигания CH_4 (9,5 % об.). (б) Временная кривая давления по результатам воспламенения угольной пыли (концентрация 200 г/м³, дисперсность 63-94 мкм)

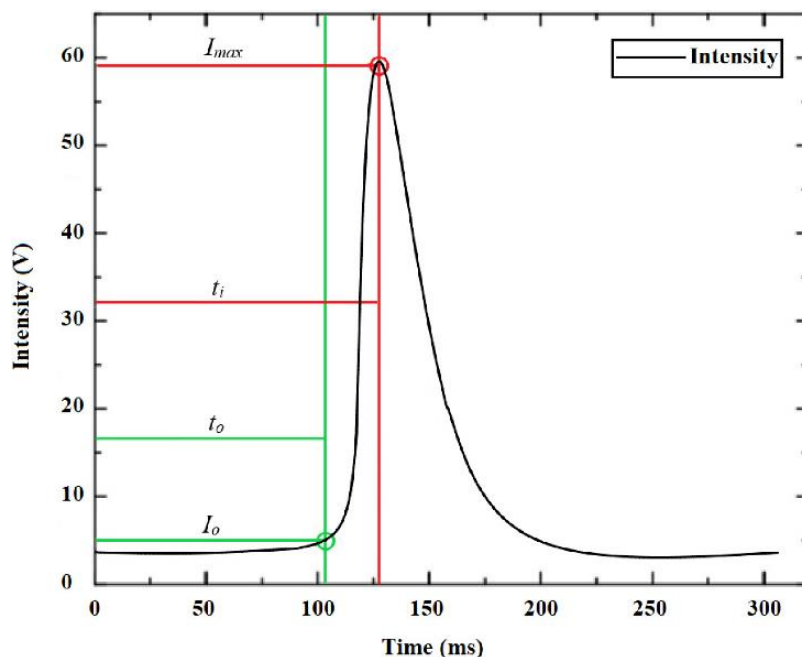


Рис. 5. Максимальная интенсивность спектрального излучения в зависимости от времени

Результаты экспериментальных исследований по измерению интенсивности излучения при взрыве метановоздушной и пылевоздушной смеси, проведенных электронно-оптическим методом, представлены в виде графика зависимости, рисунок 6.

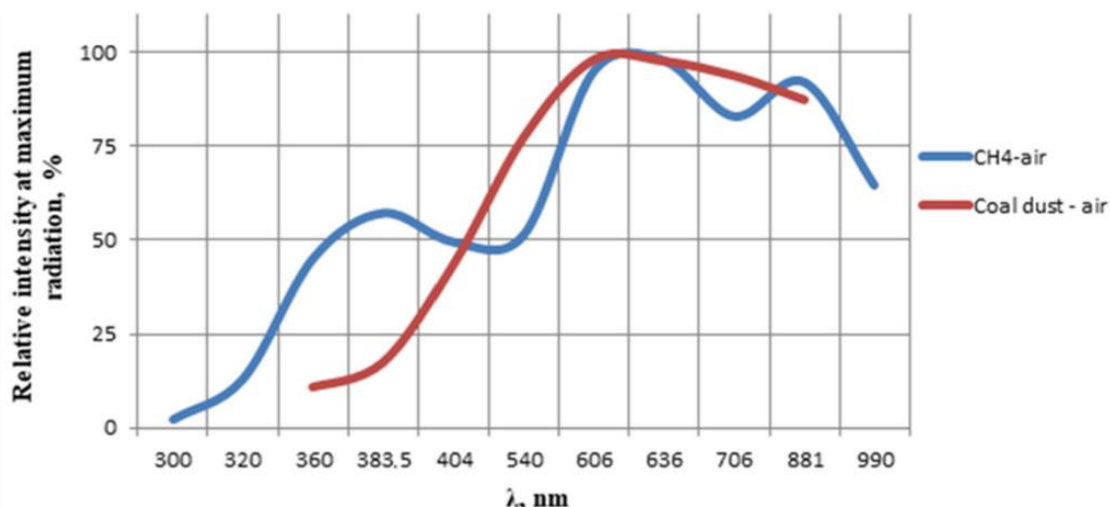


Рис. 6. Спектральное распределение энергии в максимуме излучения метанопылевоздушных смесей

Зависимость относительной интенсивности от длины волны показывает, что распределение энергии излучения по длинам волн отличается от распределения типа Планка. На графике (рис. 6) отчетливо видны два пика при длинах волн $\lambda_1 = 383,5$ нм и $\lambda_2 = 620$ нм. Эти пики появились, когда полосатый спектр молекул и радикалов наложился на непрерывный спектр излучения нагретого газа.

Точка пика в области $\lambda = 390$ нм может быть отождествлена с системой полос излучения радикала СН [36], а точка в области $\lambda = 620$ нм – с системой полос излучения молекулы C_2 (система Лебеда). Система полос молекулы C_2 также находится в диапазоне $\lambda_1 = 380$ нм.

В спектре горения метана наблюдается интенсивная серия полос, обусловленная излучением радикала ОН в ультрафиолетовой области спектра $\lambda_1 = 306$ нм. Максимум излучения в области 900 нм следует отождествить со спектром непрерывного горения метана и воздуха. В этом случае температура, определенная по пику кривой в соответствии с законом смещения Вина, составляет $T = 2610$ К, что хорошо коррелирует с данными, полученными спектрометрическими методами [37].

4. Выводы

Наличие свободных радикалов, которые считаются активными центрами цепной реакции взрыва метана, необходимо для всего процесса взрывного перехода. Некоторые свободные радикалы, такие как OH, H, O, CH₃, NO₂, CNO, особенно важны не только для процесса взрыва, но и для его подавления (ингибирования) [38-40].

Спектральный анализ пламени позволяет выявить промежуточные соединения, образующиеся при горении и взрыве, и изучить их поведение. В настоящее время оптическая спектроскопия является лучшим методом обнаружения свободных радикалов, поскольку этот метод не влияет на процесс горения и взрыва. Сравнение относительной интенсивности спектров позволяет получить данные о химических реакциях и участвующих в них радикалах.

Полученные зависимости энергетического спектрального распределения взрывов метано-воздушных смесей позволяют определить центральные длины волн полосовых фильтров и выбрать спектральные диапазоны для входных датчиков и подавления взрывов.

Так, для метановоздушных смесей целесообразно использовать спектральные области в максимумах излучения 390 нм и 900 нм. Это позволяет избежать ложных срабатываний системы взрывоподавления, которые могут быть инициированы другими источниками излучения. Для пылевоздушной смеси достаточно использовать одну спектральную область с максимумом излучения 620 нм.

Таким образом, доказано, что при разработке системы активного взрывоподавления в угольных шахтах особое внимание следует уделять выбору рабочих спектральных диапазонов рабочих спектральных длин волн для распознавания нужного сигнала.

Важнейшим параметром для оптоэлектронных приборов является достоверность решения. Это комплексный параметр, который определяется сочетанием следующих факторов:

- вероятность обнаружения пожара при отсутствии оптических помех;
- вероятность ложной тревоги;
- вероятность обнаружения пожара при наличии внешних оптических помех.

Результаты исследования помогут повысить достоверность принимаемых решений при непосредственном проектировании прибора.

Мы считаем, что дальнейшие исследования должны быть посвящены первоначальной разработке технологии обнаружения горения с последующей интеграцией ее в многофункциональные системы безопасности, предназначенные для успешного метанопылевоздушного горения и локализации взрыва в угольных шахтах, а также для обеспечения безопасности промышленных испытаний в шахтах.

Вклад авторов: разработка методологии, З.А. и С.К.; создание моделей, З.А.; подготовка и написание первоначальной версии, З.А. и В.М.; предоставление материалов исследования, З.А.; общий контроль работы, С.К.; математическая обработка, В.М.; представление данных, В.М. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: исследование выполнено за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 г. № ФСРВ-2020-0014.

Заявление Совета по институциональному надзору: не применимо.

Заявление об информированном согласии: не применимо.

Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Goncharov, E.V.; Tsirel', S.V. Geodynamic methods for assessing methane distribution in bituminous coal deposits and measures to intensify methane fluxes during mine gas drainage. *J. Min. Inst.* 2016, 222, 803. <http://doi.org/10.18454/pmi.2016.6.803>
2. Rodionov, V.A.; Pikhonen, L.V.; Zhiharev, S.Y. Analyzing application methods of thermal analysis for evaluation of explosive properties of Sokolovsky deposit coal. *Proc. Tula States Univ.-Sci. Earth* 2017, 3, 84–93.
3. Yutiaev, E.; Meshkov, A.; Popov, A.; Shabarov, A. Allocation of the geo-dynamically hazardous zones during intensive mining of flat-lying coal seams in the mines of SUEK-Kuzbass *JSC. E3S Web Conf.* 2019, 134, 01022. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/201913401022>
4. Golubev, D.D. Influence of technological factors on the formation of spontaneous combustion centers in underground mining. In *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019; pp. 75–81. <http://doi.org/10.1201/9781003017226-11>
5. Strizhenok, A.V.; Ivanov, A.V. An Advanced Technology for Stabilizing Dust Producing Surfaces of Built-Up Technogenic Massifs during Their Operation. *Power Technol. Eng.* 2016, 50, 240–243. <http://doi.org/10.1007/s10749-016-0690-y>

6. Meshkov, A.; Kazanin, O.; Sidorenko, A. Methane Emission Control at the High-Productive Longwall Panels of the Yalovsky Coal Mine. *E3S Web Conf.* 2020, 174, 01040. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401040>
7. Dmitrievich, M.R.; Alekseevich, R.V.; Borisovich, S.V. Methodological Approach to Issue of Researching Dust-Explosion Protection of Mine Workings of Coal Mines. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2019, 10, 1154–1161.
8. Kabanov, E.I.; Korshunov, G.I.; Magomet, R.D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dustair mixtures in underground workings. *J. Appl. Sci. Eng.* 2020, 24, 105–110.
9. Smirnyakov, V.; Smirnyakova, V.; Pekarchuk, D.; Orlov, F. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2019, 10, 1917–1929.
10. Koteleva, N.; Kuznetsov, V.; Vasilyeva, N. A Simulator for Educating the Digital Technologies Skills in Industry. Part One. Dynamic Simulation of Technological Processes. *Appl. Sci.* 2021, 11, 10885. <http://doi.org/10.3390/app112210885>
11. Shevtsov, N. Vzryvozaschita gornyh vyrobok: Uchebnoe posobie dlya vuzov. In *Explosion Mining: A Manual for Schools*, 2nd ed.; Nord-Press: Donetsk, Russian, 2002.
12. Vasil'ev, A.A. Estimates of the excitation conditions and extinction of blast waves during mine explosions. *Bull. Res. Cent. Saf. Coal Ind.* 2016, 2, 91–105.
13. Necepljaev, M.I. Bor'ba so vzryvami ugol'noj pyli v shahtah. In *Fighting Coal Dust Explosions in Mines*; Nedra: Moscow, Russian, 1992; p. 298.
14. Sidorenko, A.I. Pyrometric sensor with optical shutters for determining the two-dimensional coordinates of the explosion center. *Vestn. Nauchnogo Cent. be-Zopasnosti Rabot Ugol'noj Promyshlennosti* 2013, 1, 98–104.
15. Ajruni, A.T.; Klebanov, F.S.; Smirnov, O.V. Vzryvoopasnost' ugol'nyh shaht. In *Explosive-Ness of Coal Mines*; Gornoe delo OOO Kimmerijskij Centr: Moscow, Russian, 2011; p. 264.
16. Zaharenko, D.M. Problemy rannego obnaruzhenija ochagov pozharov i vzryvov ugol'noj pyli. Problems of early detection of fires and coal dust explosions], Problems of using Kansk-Achinsk coal at power plants: Materials. In Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, Russian, 21–23 November 2000; pp. 141–149.
17. Pavlov, A.N. Optiko-jelektronnaja sistema opredelenija trehmernyh koordinat ochaga vzryva v gazodispersnyh sistemah nachal'noj stadia [Optoelectronic system for determining the three-dimensional coordinates of the explosion center in gasdispersed systems of the initial stage]. Ph.D. Thesis, Biysk Institute of Technology, Biysk, Russian, 2010; p. 134.
18. Pavlov, A.N.; Sypin, E.V. Optoelectronic system for determination of ignition center three-dimensional coordinates at initial stage. In Proceedings of the 9th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2010: Conference Proceedings, NSTU, Novosibirsk, Russian, 30 June–4 July 2010; pp. 417–419.
19. Hertzberg, M.; Litton, C.D.; Donaldson, W.F.; Burgess, D. The infrared radiance and the optical detection of fires and explosions. *Symp. (Int.) Combust.* 1975, 15, 137–144. [http://doi.org/10.1016/S0082-0784\(75\)80291-8](http://doi.org/10.1016/S0082-0784(75)80291-8)
20. Tupikina, N.Y.; Sypin, E.V.; Lisakov, S.A.; Pavlov, A.N.; Leonov, G.V. Two spectral retios optic electronic instrument operational parameters experimental test. *Ind. Saf.* 2015, 4, 66–72.
21. Dzhigrin, A.V. Analysis of Explosion Localization Systems Operating in Coal Mines and Evaluation of the Effectiveness of Their Application. Available online: http://asvplv.ru/doc/expert_mvk.pdf (accessed on 19 January 2022).
22. Kaledina, N.O.; Malashkina, V.A. Indicator assessment of the reliability of mine ventilation and degassing systems functioning. *J. Min. Inst.* 2021, 250, 553–561. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.8>
23. Vasilenko, T.A.; Kirillov, A.K.; Molchanov, A.N.; Pronskii, E.A. An NMR Study of the Ratio between Free and Sorbed Methane in the Pores of Fossil Coals. *Solid Fuel Chem.* 2018, 52, 361–369. <http://doi.org/10.3103/S0361521918050087>
24. Magunov, A.N. Spektral'naja pirometrija objektov s neodnorodnoj temperaturoj. In *Spectral Pyrometry of Objects with Inhomogeneous Temperature*; FIZMATLIT: Moscow, Russian, 2012; p. 248.
25. Walker, C.G. *Handbook of Spectroscopy*; Wiley-VCH GmbH: Stuttgart, Germany, 2005.
26. Siwek, R. Experimental methods for the determination of explosion characteristics of combustible dust. In Proceedings of the 3-d International Symposium on Lose Prevention and Safety Pro-motion in the Process Industries, Basel, Switzerland, 15–19 September 1980; Volume 3.
27. Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds. Part 3: Determination of the Lower Explosion Limit LEL of Dust Clouds BS EN 14034-3:2006+A1:2011. Available online: <https://www.en-standard.eu/bs-en-14034-3-2006-a1-2011-determination-of-explosion-characteristics-of-dust-clouds-determination-of-the-lower-explosion-limit-lel-of-dust-clouds/> (accessed on 19 January 2022).
28. Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds. Part 2: Determination of the Maximum Rate of Explosion Pressure rise (dP/dt)Max of Dust Clouds BS EN 14034-2:2006+A1:2011. Available online: <https://www.en-standard.eu/bs-en-14034-2-2006-a1-2011-determination-of-explosion-characteristics-of-dust-clouds-determination-of-the-maximum-rate-of-explosionpressure-rise-dp-dt-sub-m-sub-ax-of-dust-clouds/> (accessed on 19 January 2022).
29. Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts ASTM E1515-14. Available online: <https://standards.globalspec.com/std/3857038/astm-e1515-14> (accessed on 19 January 2022).
30. Rodionov, V.A.; Pihkonen, L.V.; Zhiharev, S.Y. Dispersion of the g-type coal dust of the Vorgashorskoe field and its influence on the thermal destruction process. *Perm J. Pet. Min. Eng.* 2017, 16, 350–356. <http://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.4.6>
31. Li, Q.; Zhai, C.; Wu, H.-J.; Lin, B.-Q.; Zhu, C. Investigation on coal dust explosion characteristics using 20 L explosion sphere vessels. *J. China Coal Soc.* 2011, 36, 119–124.
32. Jiang, H.; Bi, M.; Huang, L.; Zhou, Y.; Gao, W. Suppression mechanism of ultrafine water mist containing phosphorus compounds in methane/coal dust explosions. *Energy* 2022, 239, 121987. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121987>
33. Konnov, A.A.; Dyakov, I.V.; De Ruyck, J. Measurement of adiabatic burning velocity in ethane–oxygen–nitrogen and in ethane–oxygen–argon mixtures. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2003, 27, 379–384. [http://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00242-X](http://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00242-X)
34. Chen, C.-F.; Shu, C.-M.; Wu, H.-C.; Ho, H.-H.; Ho, S.-P. Ethylene gas explosion analysis under oxygen-enriched atmospheres in a 20-liter spherical vessel. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2017, 49, 519–524. <http://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.05.022>
35. Wang, T.; Luo, Z.; Wen, H.; Zhang, J.; Mao, W.; Cheng, F.; Zhao, J.; Su, B.; Li, R.; Deng, J. Experimental study on the explosion and flame emission behaviors of methane-ethylene-air mixtures. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2019, 60, 183–194. <http://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.04.018>

-
36. Burdjugov, S.I.; Karmanov, V.V.; Halturin, V.G. Vibrational structure of the Swann bands of the electronic spectrum of radical C₂. In *Chemical Physics and Mesoscopy*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2011.
37. Wu, J.; Yan, Z.; Ye, S.; Yang, X.; Hu, D. Micro-mechanism of carbon generation from benzene's quick reaction using monochrometer. *Acta Opt. Sin.* 2007, 27, 1873–1876.
38. Wang, H.; Sheen, D.A. Combustion kinetic model uncertainty quantification, propagation and minimization. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2015, 47, 1–31. <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.10.002>
39. Abiev, Z.A.; Rodionov, V.A.; Paramonov, G.P.; Chernobaj, V.I. Methodology for studying the effect of inhibitory and phlegmatizing additives on the flammability and explosiveness of coal dust. *Gorn. Inf.-Analiticheskij Bjulleť* 2018, 5, 26–34. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-5-0-26-34>
40. Snegirev, A.Y.; Tsoy, A.S. Treatment of local extinction in CFD fire modeling. *Proc. Combust. Inst.* 2015, 35, 2519–2526. <http://doi.org/10.1016/j.proci.2014.07.051>