

УДК 614.842

Методика исследования динамики параметров задымлённой среды при переходе пиролиза в пламенное горение

А.А. Антошин¹, В.И. Никитин^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

²Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и чрезвычайных ситуаций
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь
ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь

Поступила 01.10.2019

Принята к печати 21.11.2019

Существующие методы контроля работоспособности мультикритериальных пожарных извещателей не предусматривают проверку их характеристик в условиях перехода тления в пламенное горение. Целью работы являлась разработка методики исследования параметров окружающей среды при переходе от тления (пиролиза) в пламенное горение для моделирования тестового пожара при проверке качества работы мультикритериальных пожарных извещателей.

Разработана методика проведения исследований параметров окружающей среды в условиях нагрева образцов древесины разного размера до температуры самовоспламенения и горение листов мятой и гладкой бумаги.

Впервые исследованы изменения концентрации угарного газа, удельной оптической плотности, рассеивающей способности при переходе от тления (пиролиза) в пламенное горение подготовленных образцов древесины и мятой бумаги.

Показано, что контролируемые параметры окружающей среды при переходе от тления пиролиза в пламенное горение изменяются одновременно. Установлено, что при переходе от пиролиза к пламенному горению древесины наблюдается уменьшение в 2,4 раза скорости роста рассеивающей способности дыма, скорость увеличения удельной оптической плотности и концентрации угарного газа увеличиваются в 2 и в 5,3 раза соответственно.

Ключевые слова: мультикритериальные пожарные извещатели, методы контроля, работоспособность, переход тления в пламенное горение.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

Адрес для переписки:

А.А. Антошин
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Address for correspondence:

A.A. Antoshyn
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Для цитирования:

А.А. Антошин, В.И. Никитин.
Методика исследования динамики изменения параметров задымлённой среды при переходе пиролиза в пламенное горение. Приборы и методы измерений. 2019. – Т. 10, № 4. – С. 382–390.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

For citation:

A.A. Antoshyn, V.I. Nikitin.
[Technique for Studying of the Dynamics of Changes of a Smoky Environment Parameters during the Transition of Pyrolysis to Flame Combustion].
Devices and Methods of Measurements. 2019, vol. 10, no. 4, pp. 382–390 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

Technique for Studying of the Dynamics of Changes of a Smoky Environment Parameters during the Transition of Pyrolysis to Flame Combustion

A.A. Antoshyn¹, V.I. Nikitin^{1,2}

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

²Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations
of the Republic of Belarus
Soltysa str., 183a, Minsk 220046, Belarus

Received 01.10.2019

Accepted for publication 21.11.2019

Abstract

The existing methods for monitoring the performance of multi-criteria fire detectors do not provide for verification of their characteristics in the conditions of transition from smoldering to flame burning. The aim of the work is the development of the research methods of the environmental parameters during the transition from smoldering (pyrolysis) to flame combustion for simulation a test fire while checking the quality of multi-criteria fire detectors.

A technique to conduct research of environmental parameters under conditions of heating wood samples of different sizes to a temperature of selfignition and burning crumpled and smooth paper has been developed.

Changes in the concentration of carbon monoxide, specific optical density, and scattering ability during the transition from smoldering (pyrolysis) to flame burning of prepared wood and crumpled paper were studied for the first time.

It is shown that the controlled environmental parameters during the transition from smoldering pyrolysis to flame burning change together. Conclusion: the speed of growth of the scattering ability of smoke decreases by 2.4 times, the speed of increase in the specific optical density and concentration of carbon monoxide increases by 2 and 5.3 times (respectively), during the transition from pyrolysis to flame burning of wood.

Keywords: multicriteria fire detectors, control methods, operability, transition of smoldering to flame burning.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

Адрес для переписки:

А.А. Антошин
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Address for correspondence:

A.A. Antoshyn
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Для цитирования:

А.А. Антошин, В.И. Никитин.
Методика исследования динамики изменения параметров
задымлённой среды при переходе пиролиза в пламенное горение.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 382–390.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

For citation:

A.A. Antoshyn, V.I. Nikitin.
[Technique for Studying of the Dynamics of Changes of a Smoky
Environment Parameters during the Transition
of Pyrolysis to Flame Combustion].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 382–390 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

Введение

Известно, что мультикритериальные пожарные извещатели успешно внедряются во всём мире, так как способны обнаруживать пожар с высокой достоверностью. Отличие мультикритериального извещателя от комбинированного заключается в наличии у него сложного алгоритма обработки информации по сравнению с простой логикой «ИЛИ» у комбинированных пожарных извещателей [1].

Согласно данным, приведённым в работах [2] и [3] существующие алгоритмы работы мультикритериального извещателя основаны на логике «И», при которой также оценивается динамика изменения одного из контролируемых факторов пожара и усиливается чувствительность остальных сенсоров.

Определение мультикритериального детектора по *NFPA 72* [4] включает в себя требование о наличии сложного алгоритма обработки информации и, кроме того, выделяется основной обнаруживаемый фактор.

Таким образом, в алгоритме работы мультикритериального извещателя предусматривается выдача одного сигнала о пожаре при стабильном развитии одного типа горения, например, тление или пламенное горение. Однако не учитываются нестандартные ситуации развития пожара, а именно случаи горения с переходом одного типа горения в другой.

Переходной процесс от тления к пламенному горению исследовался в работе [5]. Авторы исследовали переходной процесс от тления к пламенному горению писчей бумаги. Для указанного переходного процесса характерны резкие изменения параметров окружающей среды:

- резкое увеличение температуры на потолке испытательной камеры при воспламенении бумаги;
- резкое снижение значений интенсивности рассеянного света;
- резкое увеличение коэффициента светопропускания.

Указанный переходной процесс может быть неверно идентифицирован мультикритериальными пожарными извещателями. К примеру, при пожаре после снижения плотности дыма может возникнуть пламенное горение, что может не учитываться извещателем и он может сигнализировать о прекращении горения (локализации и затухании).

Испытания по тестовому пожару, имитирующему такой сложный процесс перехода тления в пламенное горение, необходимо обязательно предусмотреть для оценки качества мультикритериальных извещателей.

В испытаниях пожарных извещателей широко используются стандартные тестовые пожары [6–9, *]. Во всех случаях каждый тестовый пожар моделирует один из типов горения и не предусматривает проверку работы извещателей при переходе от тления к пламенному горению.

Хорошо известно, что пламенное горение твердых горючих материалов начинается с термического разложения, в результате которого образуются горючие газы, которые при нагреве воспламеняются. Процесс термического разложения материала может сопровождаться достаточно большим тепловыделением, что может привести к тлению. Тление при определённых условиях может перейти в пламенное горение [10].

Примеры материалов, склонных к тлеющему горению, условия, необходимые для возникновения тлеющего горения, а также условия перехода от тления к пламенному горению описаны в [11, 12].

Изучение процесса тления и условий, при которых возможен процесс тления, проводилось в [13].

В работе [11] проанализировано распространение тления вдоль целлюлозных материалов. Выделены 3 области волны горения при тлении:

- зона пиролиза, характеризующаяся резким подъёмом температуры, где происходит истечение видимых летучих продуктов из исходного материала;
- зона углистого остатка, где температура достигает максимума, и прекращается эволюция видимых продуктов пиролиза, и начинается накаливание;
- зона сильнопористого углистого остатка, где остаток больше не нагревается и температура падает.

Только пористые материалы, которые при нагревании образуют твёрдый углистый остаток, могут претерпевать самостоятельно подерживаемое тлеющее горение [12].

Пламенное горение может установиться на поверхности твёрдого вещества лишь в том

* – ГОСТ Р 57552-2017 «Техника пожарная. Извещатели пожарные мультикритериальные. Общие технические требования и методы испытаний».

случае, если скорость выделения летучих продуктов превзойдет определённую критическую скорость. Для достижения температур, необходимых для этого, требуется большое количество времени [12].

Однако во всех указанных работах изучались только температура и скорость перехода от тления к пламенному горению. При этом остались не изученными такие параметры окружающей среды, как: оптическая плотность, рассеивающая способность, концентрация угарного газа.

Целью настоящей работы являлась разработка методики исследования параметров окружающей среды при переходе от тления (пиролиза) в пламенное горение для моделирования тестового пожара для проверки качества мультикритериальных извещателей.

Методика проведения исследований

В работе исследовано изменение характеристик окружающей среды в условиях нагрева образцов древесины разного размера до температуры самовоспламенения и горение листов мятой и гладкой бумаги. Измерялись концентрация угарного газа (СО), удельная оптическая плотность и поток оптического излучения, рассеянный на углы от 11 до 15°, а также температура на нагревательной поверхности электроплитки, на потолке испытательной камеры и на входе в вытяжной канал. Исследования проводились в испытательной камере размером 2 × 2 × 2,5 м с вытяжным каналом сечением 600 × 380 мм (рисунок 1). В вытяжном канале устанавливаются датчики угарного газа и измерительная система для измерения оптических характеристик газовой среды. На полу испытательной камеры устанавливалась электроплита, мощностью 2 кВт, диаметром 220 мм с восьмью концентрическими каналами глубиной 2 мм и шириной 5 мм каждая. Поверхность плиты нагревалась до 600 °С.

В качестве топлива для тестовых пожаров использовались образцы древесины, а также листы мятой и гладкой бумаги с параметрами, приведенными в таблице 1.

В качестве средств измерения параметров окружающей среды при горении тестовых пожаров использовались: газоанализатор дымовых газов *Multilyzer NG* (с погрешностью 5 % от измеренной величины); установка «Дымовой канал», позволяющая моделировать пожары в условиях, приближенных к реальным пожарам в бытовых помеще-

ниях [14]. Установка «Дымовой канал» включает в себя измеритель-регулятор «Сосна-004» термоэлектрическим преобразователем ТХА(К)-1199, имеющим диапазон измерения от – 50 °С до + 500 °С и измерительный узел установки для измерения оптических характеристик дыма (удельной оптической плотности и величины потока оптического излучения, рассеянного частицами дыма).

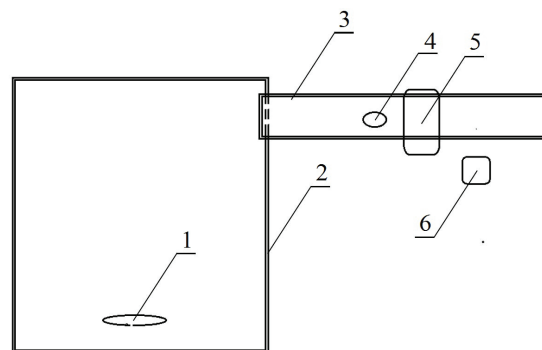


Рисунок 1 – Испытательная камера и места расположения оборудования и средств измерений: 1 – нагревательная плитка; 2 – испытательная камера; 3 – вытяжной канал; 4 – место установки газоанализатора; 5 – оптический измерительный узел; 6 – измеритель температуры

Figure 1 – Test chamber with equipment locations and measuring instruments: 1 – heating plate; 2 – test chamber; 3 – exhaust duct; 4 – gas analyzer installation site; 5 – optical measuring unit; 6 – temperature meter

Таблица 1 / Table 1

Характеристики топлива для тестовых пожаров

Characteristics of fuel for test fires

Номер образца Sample Number	Вид топлива Type of fuel	Размеры, мм Sizes, mm	Масса, г Mass, g
1	ель/spruce	2 × 10 × 75	14
2	осина/aspen	3,5 × 10 × 75	13,7
3	осина/aspen	6 × 10 × 75	13,5
4	осина/aspen	20 × 20 × 75	11,5
5	писчая бумага мятая wrinkled paper	формат А4 A4 format	4,5
6	писчая бумага гладкая smooth writing paper	формат А4 A4 format	50

Для измерения рассеянного излучения использовалась установка для измерения рассеянного излучения по методу Шифрина [15]. Установка регистрирует излучение, рассеянное под углами от 3° до 11° , а также излучение прошедшее через исследуемую среду без рассеяния. Имеется возможность фокусировать оптическое излучение, рассеянное под углами от 3° до 11° на фотоприёмнике, расположенном за фокусом объектива. Таким образом, измеряется интегральная характеристика оптического излучения, рассеянного на углы от 3 до 11° . Измерение интенсивности прошедшего через исследуемую среду оптического излучения позволяет определять оптическую плотность газовой среды, содержащей аэрозоль разной природы.

Для измерения температуры на потолке, на входе в вытяжной канал и на плитке устанавливались термопары, которые подключались к измерителю-регулятору «Сосна-004».

Электроплитка при включении постепенно нагревалась до максимальной температуры (около 600°C).

Для моделирования режима перехода от тления к пламенному горению образцы древесины и листы мягкой бумаги располагались равномерно на электроплитке, температура которой не превышала температуру окружающей среды. После этого включалась электроплитка, температура на которой постоянно повышалась. Рост температуры за 14 мин составил 480°C .

Изменение температуры фиксировалось каждые 30 с термопарой, уложенной в один из концентрических каналов на электроплитке. Одновременно фиксировались температура на входе в вытяжной канал и температура под потолком испытательной камеры (высота потолка 2,4 м) на оси пожара. Температура воздуха в начале эксперимента составляла 18°C .

На расстоянии 4 м от оси пожара в дымовом канале проводились измерения удельной оптической плотности и рассеянного излучения. Расстояние, которое проходило зондирующее излучение поперёк дымового канала, составляло 600 мм. Скорость воздушного потока измерялась на входе в канал и была равна примерно 0,2 м/с. Измерение удельной оптической плотности и рассеянного излучения с помощью измерительного узла установки для измерения оптических характеристик дыма проводилось также через каждые 30 с в течение 14 мин с момента начала нагрева электроплитки.

Исследование характеристик

Изменения концентрации угарного газа, удельной оптической плотности, рассеивающей способности при нагреве образца, изготовленного из ели толщиной 2 мм (образец № 1), приведены на рисунке 2.

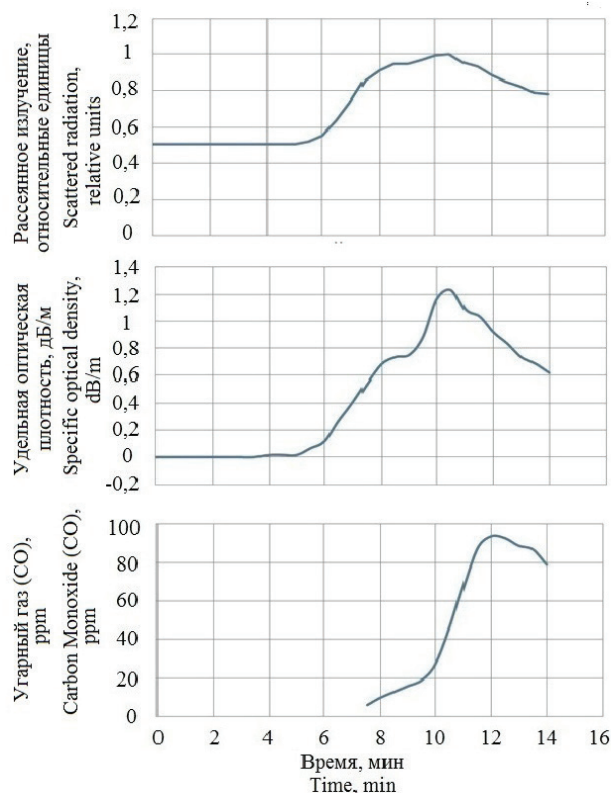


Рисунок 2 – Изменения рассеянного излучения, удельной оптической плотности, концентрации угарного газа при нагреве деревянных брусочков размера $2 \times 10 \times 75$ мм

Figure 2 – Changes of scattered radiation, specific optical density, carbon monoxide concentration when heating wooden blocks with dimensions of $2 \times 10 \times 75$ mm

При нагревании плитки, начиная с 5 минуты при температуре на ней 275°C и выше, наблюдалось постепенное увеличение потока рассеянного излучения и значений удельной оптической плотности.

Наличие угарного газа CO также фиксировалось, начиная с 7,5 минуты, что обусловлено некоторой инерционностью (до 60 с согласно паспорту) в фиксировании значений газоанализатором дымовых газов *Multilyzer NG*.

Из рисунка 2 видно, что:

1. Происходило равномерное увеличение следующих параметров до определённого времени:

– изменение удельной оптической плотности (от 0 до 0,68 дБ/м) до 8 минуты;

– изменение потока рассеянного излучения (от 0,5 до 0,85 отн. ед.) до 7,5 минуты;

– изменение концентрации угарного газа (СО) (до 19 ppm) до 9,5 минуты.

2. Изменения контролируемых параметров имели иной, более плавный во времени, характер:

– начиная с 8 и до 9,5 минуты для удельной оптической плотности (изменения от 0,68 до 0,88 дБ/м);

– начиная с 7,5 минуты до 10,5 минуты для рассеянного излучения (изменения от 0,85 до 1 отн.ед.).

При этом с 8,5 минуты вплоть до 9 минуты (период около 30 с) удельная оптическая плотность (около 0,75 дБ/м) и рассеянное излучение (0,95 отн. ед.) существенно не изменялись.

3. Возобновление резкого изменения удельной оптической плотности началось с 9,5 минуты вплоть до 10,5 минуты (630 с) (изменения оптической плотности с 0,88 дБ/м до 1,23 дБ/м).

Изменения температуры на плитке, на потолке испытательной камеры и на входе в вытяжной канал представлены на рисунке 3.

Воспламенение образца, изготовленного из ели толщиной 2 мм (образец № 1) наблюдалось при температуре поверхности плиты около 400 °С.

Удельная оптическая плотность после 10,5 минуты начала снижаться. В отношении динамики изменения значений угарного газа (СО) отметим, что начиная с 9,5 минуты до 12 минуты концентрация угарного газа (СО) увеличивается по линейной зависимости (с 19 до 94 ppm). После 12 минуты начинается уменьшение концентрации угарного газа (СО).

При нагревании образцов толщиной более 2-х мм и образцов мятой бумаги (№ 2–5) их воспламенения не наблюдалось, но при этом обнаружена зависимость концентрации угарного газа от исходной толщины образца. Чем толще образец, тем позднее и при большей температуре на поверхности плиты появлялся угарный газ.

В случае тления гладкой бумаги удельная оптическая плотность достигала значения 4 дБ/м через 520 с. В первые 260 с, пока температура бумаги не достигла значения температуры тления, происходит медленное изменение оптических характеристик среды под потолком, удельная оптическая плотность при этом достигает значения 0,2 дБ/м. Достигнув температуры тления, за последующие 260 с, удельная оптическая плотность увеличивается до 4 дБ/м. Медленный незначительный рост температуры

до момента самовоспламенения бумаги в основном определяется тепловыделением электроплиты. Одновременно быстро нарастает интенсивность рассеянного излучения. После самовоспламенения бумаги начинается быстрый рост температуры и одновременно уменьшается удельная оптическая плотность и интенсивность рассеянного излучения [5].

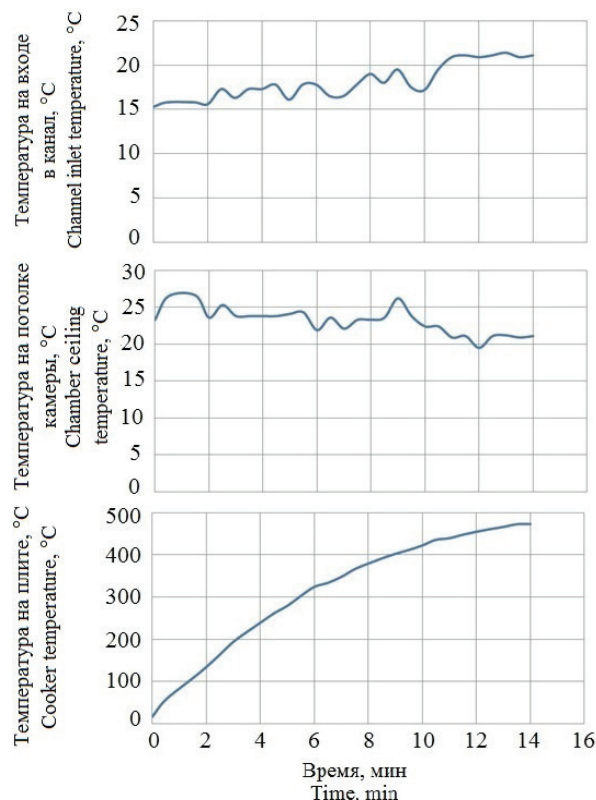


Рисунок 3 – Изменения температуры на плитке, вблизи потолка камеры и на входе в вытяжной канал

Figure 3 – Temperature changes on the plate, near the ceiling of the chamber and at the entrance to the exhaust duct

Анализируя рисунок 4, делаем вывод, что переходной процесс от тления к пламенному горению гладкой бумаги описывается следующими зависимостями:

- резкое увеличение температуры на потолке испытательной камеры при воспламенении бумаги;
- резкое снижение значений интенсивности рассеянного света;
- резкое увеличение коэффициента светопропускания.

Количественные значения динамики изменения контролируемых параметров во времени при нагревании образцов древесины толщиной 2 мм для этапов пиролиза и пламенного горения приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Скорость изменения потока рассеянного излучения, удельной оптической плотности, концентрации угарного газа окружающей среды в помещении на этапах пиролиза и пламенного горения

Speed of change of scattered radiation flux, specific optical density, carbon monoxide concentration the environmental parameters in the room at the stages of pyrolysis and flame combustion

Контролируемые параметры окружающей среды Controlled environmental parameters	Скорость изменения параметра на этапе пиролиза The rate of change of the parameter at the stage of pyrolysis	Скорость изменения параметра на этапе пламенного горения The rate of change of the parameter at the stage of flame combustion
Поток рассеянного излучения Scattered radiation flux	0,140 мин ⁻¹ /min ⁻¹	0,058 мин ⁻¹ /min ⁻¹
Удельная оптическая плотность Specific gravity	0,204 (дБ/м) мин ⁻¹ /(dB/m) min ⁻¹	0,416 (дБ/м) мин ⁻¹ /(dB/m) min ⁻¹
Концентрация угарного газа Carbon monoxide concentration	6,5 ppm мин ⁻¹ /min ⁻¹	34,5 ppm мин ⁻¹ /ppm min ⁻¹

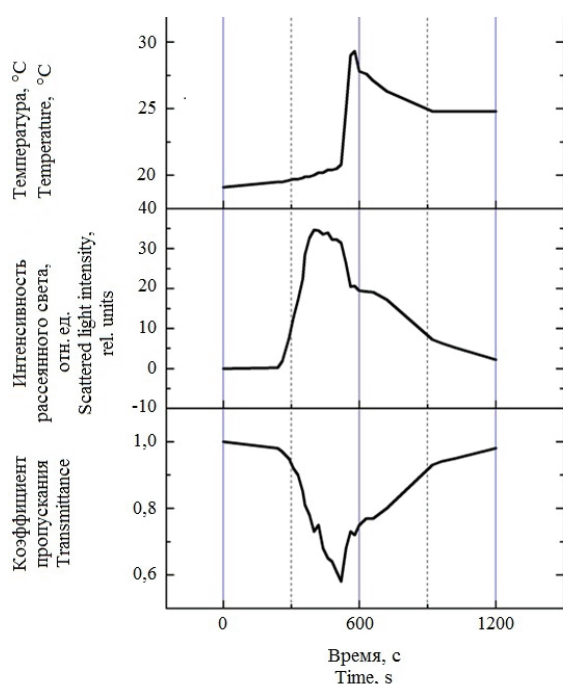


Рисунок 4 – Изменение временных зависимостей температуры под потолком помещения, интенсивности рассеянного излучения и коэффициента пропускания среды при переходе пиролиза (до 520 с) в пламенное горение бумаги

Figure 4 – Change in the time dependences of the temperature under the ceiling of the room, the intensity of the scattered radiation and the coefficient of transmittance of the medium during the transition from pyrolysis (up to 520 s) to flame burning of paper

В результате сравнения результатов, полученных в данной работе при нагревании образцов древесины толщиной 2 мм, с результатами работы [5], делаем следующие выводы:

– первый этап нагрева (пиролиза) образцов древесины так же, как и образцов гладкой бумаги, характеризуется одновременным нарастанием значений потока рассеянного излучения, удельной оптической плотности, а также концентрации угарного газа (для гладкой бумаги измерения СО не проводились);

– второй этап пламенного горения (с 8 до 10,5 мин – для образцов из древесины, с 520 до 570 с – для образцов гладкой бумаги) характеризуется одновременными (в пределах погрешности измерений) более резкими изменениями удельной оптической плотности и концентрации угарного газа, а также более плавными изменениями скорости нарастания рассеянного излучения;

– третий этап затухания характеризуется одновременным уменьшением значений всех контролируемых параметров.

Закключение

Разработана методика, с помощью которой впервые выполнено одновременное исследование динамики изменения концентрации угарного

газа, удельной оптической плотности, рассеивающей способности в одной и той же области окружающей среды, содержащей продукты горения, при переходе пиролиза в пламенное горение древесины и писчей бумаги. Измерения выполнялись в области среды, расположенной на расстоянии от оси пожара, характерном для положения пожарных извещателей.

Показано, что вблизи потолка помещения на удалении от оси пожара, соответствующему максимально возможному расстоянию от оси пожара до извещателя, в исследовании оно составляло 4 м, при переходе пиролиза в пламенное горение древесины и листов пищевой бумаги концентрация угарного газа, температура, удельная оптическая плотность и рассеивающая способность окружающей среды, содержащей продукты горения, изменяются одновременно.

Установлено, что при переходе от пиролиза к пламенному горению древесины наблюдается уменьшение в 2,4 раза скорости роста рассеивающей способности дыма, скорость увеличения удельной оптической плотности и концентрации угарного газа увеличиваются в 2 и в 5,3 раза соответственно.

Список использованных источников

1. Членов, А.Н. Об эффективности функционирования мультикритериального пожарного извещателя / А.Н. Членов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 12. – С. 55–60.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.55-60

2. Здор, В.Л. Мультикритериальные пожарные извещатели. Перспективы применения // Пожарная безопасность. – 2015. – № 2. – С. 113–117.

3. Неплохов, И. Пожарные извещатели: XXI век / И. Неплохов [и др.] // Технологии защиты. – 2017. – № 4. – С. 20–25.

4. NFPA 72-2013 National Fire Alarm Code 2013 Edition.

5. Зуйков, И.Е. Измерение характеристик воздуха в верхней зоне помещения при горении бумажной продукции / И.Е. Зуйков [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1(8). – С. 68–72.

DOI: 10.21122/2220-9506-2014-0-1-122-123

6. Баканов, В. Мультикритериальные пожарные извещатели по российским и европейским стандартам / В. Баканов // Технологии защиты. – 2014. – № 3. – С. 73–77.

7. Скорфилд, С. Мультисенсор – эффективное решение проблемы ложных срабатываний систем по-

жарной сигнализации / С. Скорфилд // Системы безопасности. – 2006. – № 5. – С. 128–132.

8. EN 54-7 «Fire detection and fire alarm systems - Part 7: Smoke detectors – Point smoke detectors that operate using scattered light, transmitted light or ionization».

9. EN 54-31 «Fire detection and fire alarm systems - Part 31: Multi-sensor fire detectors – Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors».

10. Киреев, А.А. Исследование повторного воспламенения древесины, обработанной гелеобразующими огнетушащими составами / А.А. Киреев, С.Н. Бондаренко // Проблемы пожарной безопасности. Вып. 25. – Харьков: УГЗУ. – 2009. – С. 65–72.

11. Драйздел, Д. Введение в динамику пожаров / под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

12. Исследование пожаров, связанных с источником малой мощности (в виде тлеющего табачного изделия). – Красноярск: СЭУ ФПС ИПЛ по Кк, 2014. – 13 с.

13. Козлитин, А.А. Развитие пожара от источника зажигания малой мощности / А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, И.Н. Непочатых // Научный вестник НИИ ГД «Респиратор». – 2016. – № 4. – С. 43–50.

14. Зуйков, И.Е. Установка, моделирующая пожары в начальной стадии развития / И.Е. Зуйков // Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики: сб. науч. тр. / под ред. Н.П. Мигуна. – Минск: Институт прикладной физики НАН Беларуси. – 2011. – С. 197–202.

15. Зуйков, И.Е. Контроль концентрации дыма при проведении испытаний дымовых оптических точечных пожарных извещателей / И.Е. Зуйков // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2009. – № 2(26). – С. 17–29.

References

1. Chlenov A.N., Butskinskaya T.A., Zhuravlev S.Yu., Nikolaev V.A. [About the efficiency of the multi-criteria fire detector]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2016, vol. 25, no. 12, pp. 55–60 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.55-60

2. Zdor V.L. [Multi-criteria fire detectors. Prospects of use]. *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire safety], 2015, no 2, pp. 113–117 (in Russian).

3. Neplokhov I., Afanasyev V. [Fire detectors: XXI century]. *Tekhnologii zashchity* [Protection Technologies], 2017, no. 4, pp. 20–25 (in Russian).

4. NFPA 72-2013 National Fire Alarm Code 2013 Edition.

5. Zuykov I.E., Antoshin A.A., Esipovich D.L., Olefir G.I. [Measurement of air characteristics in the

upper zone of a room when burning paper products]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2014, no. 1(8), pp. 68–72 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2014-0-1-122-123

6. Bakanov V. [Multi-criteria fire detectors according to Russian and European standards]. *Tekhnologii zashchity* [Protection Technologies], 2014, no. 3, pp. 73–77 (in Russian).

7. Scorfield S. [Multisensor – an effective solution to the problem of false alarms of fire alarm systems]. *Sistemy bezopasnosti* [Security Systems], 2006, no. 5, pp. 128–132 (in Russian).

8. EN 54-7 "Fire detection and fire alarm systems - Part 7: Smoke detectors – Point smoke detectors that operate using scattered light, transmitted light or ionization".

9. EN 54-31 "Fire detection and fire alarm systems - Part 31: Multi-sensor fire detectors – Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors".

10. Kireev A.A., Bondarenko S.N. [The study of repeated inflammation of wood treated with gelling extingishing agents]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti* [Problems of fire safety]. Kharkov: Ural State Pedagogical University, 2009, vol. 25, pp. 65–72 (in Russian).

11. Dreisdel D. *Vvedenie v dinamiku pozharov* [Introduction to the dynamics of fires]. Ed. Yu.A. Koshmarov, V.E. Makarov. Moscow: Stroyizdat Publ., 1990, 424 p.

12. Investigation of fires associated with a source of low power (in the form of a smoldering tobacco product): Method. allowance. Krasnoyarsk: SEU FPS IPL according to Kk, 2014, 13 p.

13. Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Nepochatykh I.N. [Fire development from a low power ignition source]. *Nauchnyj vestnik NII GD "Respirator"* [Scientific Herald of the Research Institute of State Duma "Respirator"], 2016, no. 4, pp. 43–50 (in Russian).

14. Zuikov I.E. [Device for Modelling of Early Stages of Fire Development. Collection of Scientific Papers]. *Dostizheniya fiziki nerazrushayushchego kontrolya i technicheskoy diagnostiki*, ed. N.P. Migun. Minsk, Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences of Belarus, 2011, pp. 197–202 (in Russian).

15. Zuikov I.E. [Control of smoke concentration during testing of smoke optical point detectors]. *Chrezvychajnye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya* [Emergencies: prevention and response], 2009, no. 2(26), pp. 17–29 (in Russian).