

УДК 622.8:53.08

© С.А. Терентьев, Е.В. Сыпин, Ли Хи Ун, 2018

**С.А. ТЕРЕНТЬЕВ**

старший преподаватель  
БТИ АлтГТУ, г. Бийск  
e-mail: sergey@bti.secna.ru



**Е.В. СЫПИН**

канд. техн. наук, доцент  
БТИ АлтГТУ, г. Бийск  
e-mail: sev@bti.secna.ru



**ЛИ ХИ УН**

д-р техн. наук, проф., ученый секретарь  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
e-mail: leeanatoly@mail.ru



## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ ГОРЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

*В статье рассказывается о разработке оптико-электронного прибора (ОЭП) определения местоположения начальной стадии развития горения в газодисперсных системах. Приведена информация о лабораторных испытаниях и определены характеристики ОЭП. Доказана работоспособность прибора.*

Ключевые слова: ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР, НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ ГОРЕНИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ.

### Введение

Такие технологические процессы, как сушка, хранение, измельчение материалов, транспортировка пневмотранспортом, шлифовка поверхностей зачастую образуют взрывоопасные газодисперсные системы. В случаях аварийных ситуаций или нарушения технологических режимов газодисперсные

системы могут воспламеняться с возможным переходом в стадию взрыва [1]. Наиболее опасны такие взрывы в угольных шахтах.

Для предотвращения взрывов перспективно использовать автоматические системы локализации горения (АСЛГ) [2]. Любая АСЛГ состоит из двух элементов:

— техническое средство обнаружения начальной стадии горения (ТСО);

— устройство пожаротушения, способное за короткое время нейтрализовать очаг горения.

Для обеспечения быстродействия ТСО начальной стадии горения перспективно использовать оптико-электронные приборы [3].

Для уменьшения влияния промежуточной газодисперсной системы на работу ОЭП предложено использовать метод спектральной пирометрии [4–6]. Температура спектрального отношения не зависит от поглощающих свойств среды, если они не вносят изменений в спектр излучения.

Предпочтительнее система, содержащая ОЭП, определяющий координаты горения, и небольшие устройства пожаротушения, распределённые по защищаемому объекту [7–9].

### Постановка задачи

Цель работы: создание ОЭП с заданной чувствительностью, инерционностью, независимостью его характеристик от свойств

газопылевой среды, способного определять координаты очага возгорания.

Задачи:

— разработка ОЭП, способного определять двумерные координаты очага возгорания;

— математическое моделирование геометрических параметров оптической системы ОЭП;

— разработка лабораторных установок для определения неравномерности чувствительности ячеек приемников излучения, для исследования точности определения двумерных координат очага возгорания;

— разработка методик лабораторных исследований ОЭП и определения его характеристик;

— экспериментальное подтверждение требуемых характеристик разработанного ОЭП на базе лабораторной установки для взрывов угле-метано-воздушных смесей.

Структурная схема оптической системы ОЭП представлена на рис. 1 [10–11].

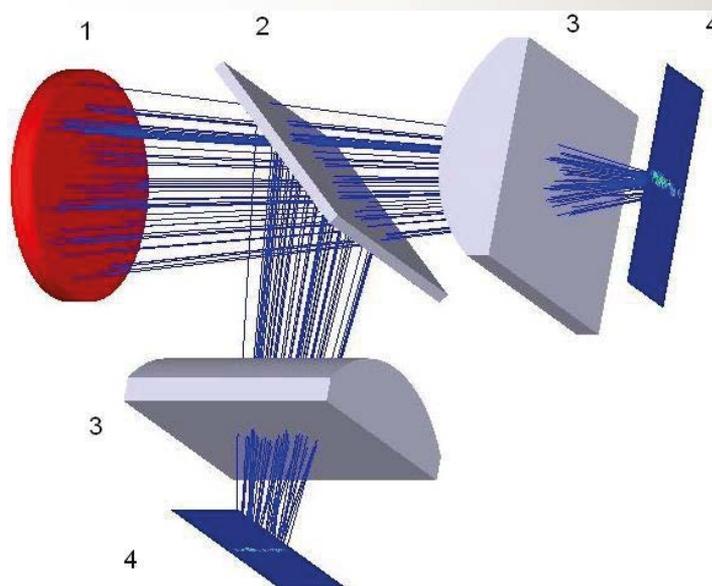


Рис. 1. Структурная схема оптической системы ОЭП определения очага возгорания с цилиндрическими линзами: 1 — объектив; 2 — разделитель светового потока; 3 — цилиндрическая линза; 4 — однокоординатные приемники излучения со светофильтрами

Излучение контролируемой области собирается при помощи объектива 1 и разделяется светоделительной пластиной 2 на два потока (оптических канала). Каждый из этих

потоков, посредством цилиндрических линз 3, фокусируется в отрезок, который пересекает ОПИ 4, одновременно происходит выделение узкого спектра энергии светофильтрами.

### А. Математическое моделирование геометрических параметров оптической системы ОЭП

С целью определения геометрических размеров предложенной оптической системы было выполнено моделирование с помощью программы Zemax.

Исходными данными для моделирования были:

— очаг возгорания является абсолютно черным телом (для математического моделирования в данной ситуации использование модели излучателя в виде абсолютно черного тела является типичным);

- температура очага возгорания 600 °С;
- видимая площадь очага 0,01 м<sup>2</sup>;
- расстояние до очага возгорания 10 м;
- коэффициент пропускания промежуточной среды равен 1;

— коэффициент пропускания оптической системы равен 0,5 (учтено только полупрозрачное зеркало);

— светофильтр имеет длину волны 800 нм с шириной полосы пропускания ±10 нм.

В результате моделирования были получены геометрические параметры оптической системы, приведенные в [11, 12].

### В. Разработка ОЭП

На основании моделирования были выбраны компоненты для ОЭП.

Фотодиодные линейки S4111-16R фирмы Hamamatsu Photonics К.К., имеющие 16 ячеек с размером 0,9×1,45 мм×мм. Спектральная чувствительность S4111-16R приведена на рис. 2.

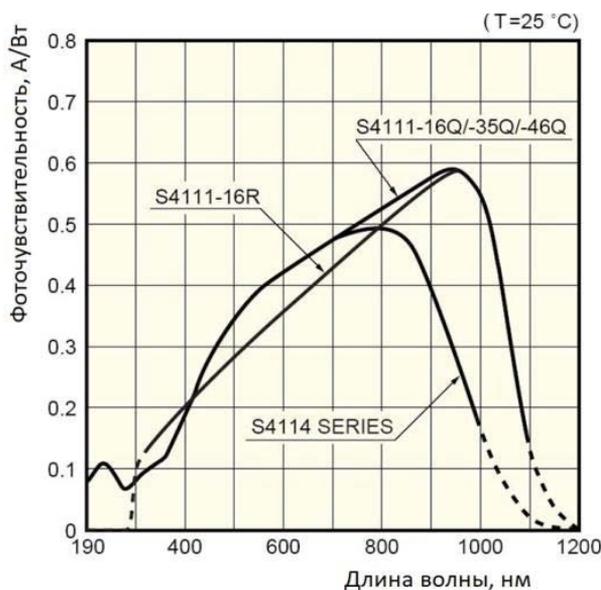


Рис. 2. Спектральная чувствительность S4111-16R

Исходя из окон прозрачности атмосферы и спектральной чувствительности фотодиодной линейки, были выбраны светофильтры с длинами волн 890 нм и 1000 нм.

Спектральные характеристики выбранных светофильтров представлены на рис. 3.

Структурная схема электронной части ОЭП представлена на рис. 4.

После выбора оптических и электронных компонентов был изготовлен лабораторный образец ОЭП (рис. 5).

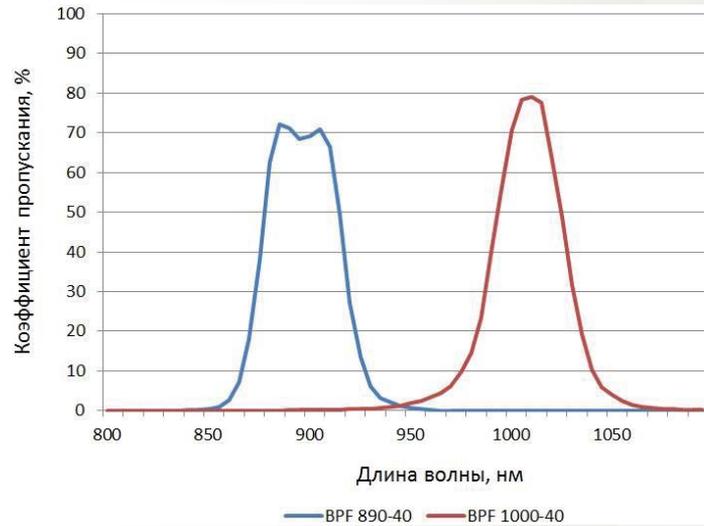


Рис. 3. Спектры пропускания светофильтров BPF 890-40 и BPF 1000-40

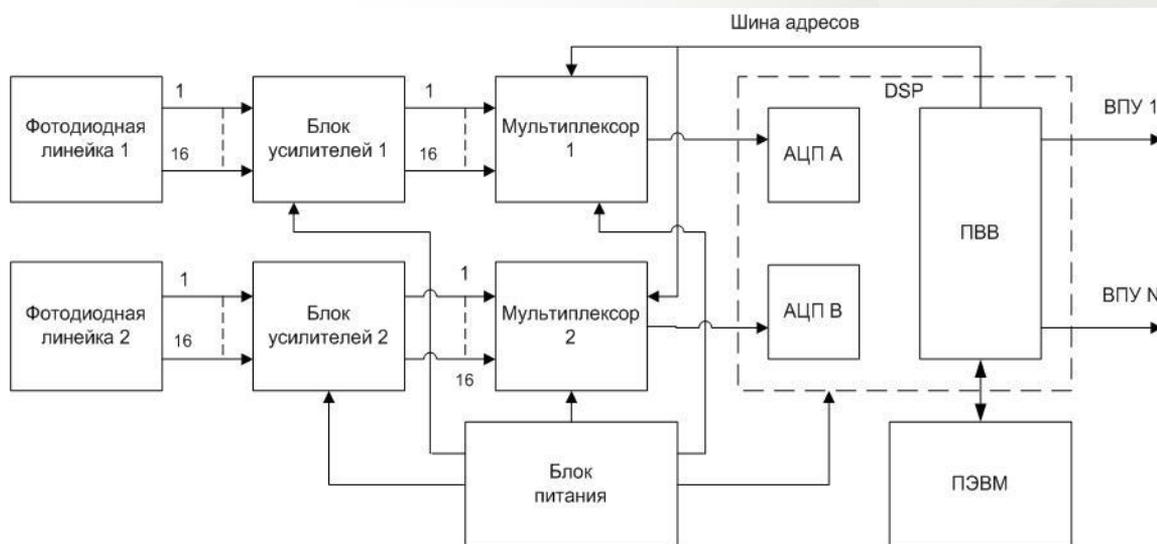


Рис. 4. Упрощенная структурная схема электронной части ОЭП:  
 ПВВ — порты ввода-вывода;  
 ВПУ — взрывоподавляющее устройство



Рис. 5. Фотография ОЭП

## Лабораторные исследования ОЭП

### А. Угловое поле и погрешность определения координат ОЭП

Для определения углового поля ОЭП и погрешности определения координат была разработана лабораторная установка (рис. 6) [13].

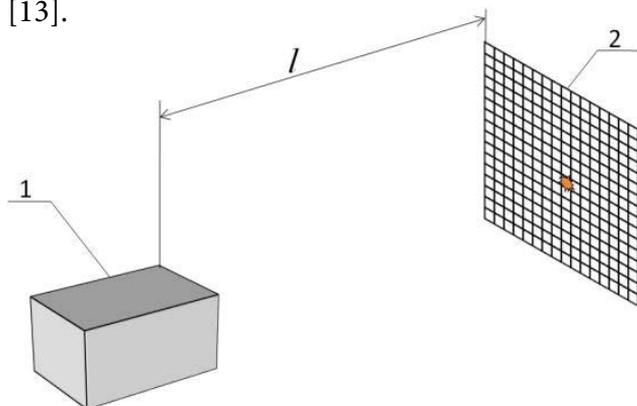


Рис. 6. Схема лабораторной установки для определения погрешности по координатам: 1 — ОЭП; 2 — опора источника излучения

После проведенных исследований по методике [13] получены следующие результаты:

- угловое поле  $2\omega = 9,80$ ;
- погрешность в определении координат  $\delta = 7,8 \%$ , при вероятности  $P = 0,99$ .

### В. Неравномерность чувствительности ячеек фотодиодных линеек

Структурная схема лабораторной установки для определения неравномерности чувствительности однокоординатных приемников излучения (ОПИ) представлена на рис. 7 [14].

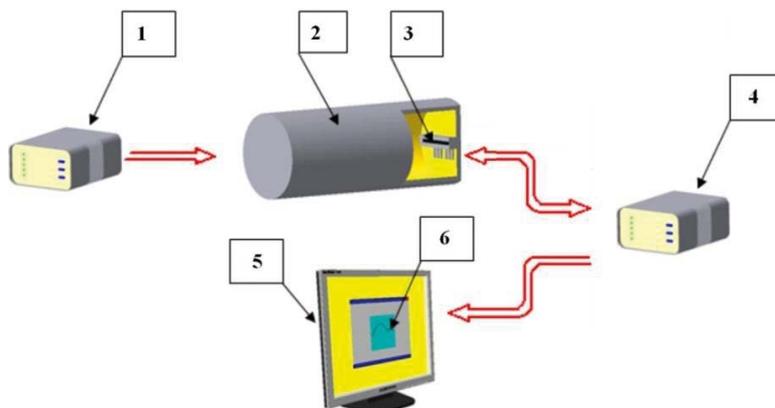


Рис. 7. Структурная схема лабораторной установки для определения неравномерности чувствительности: 1 — высокостабильный блок питания; 2 — оптическая система; 3 — ОПИ; 4 — блок обработки измерительной информации; 5 — ПК; 6 — программное обеспечение

Высокостабильный блок питания 1 для источника света представляет собой источник питания постоянного тока с пульсациями напряжения не более 0,05 %. Оптическая система 2 обеспечивает известную освещенность каждой ячейки ОПИ 3. Сигналы с ОПИ 3 через блок обработки 4 поступают на ПК 5.

ПО 6 обеспечивает вычисление поправочных коэффициентов.

В результате лабораторных исследований по методике, представленной в [15], были получены поправочные коэффициенты, представленные на рис. 8.

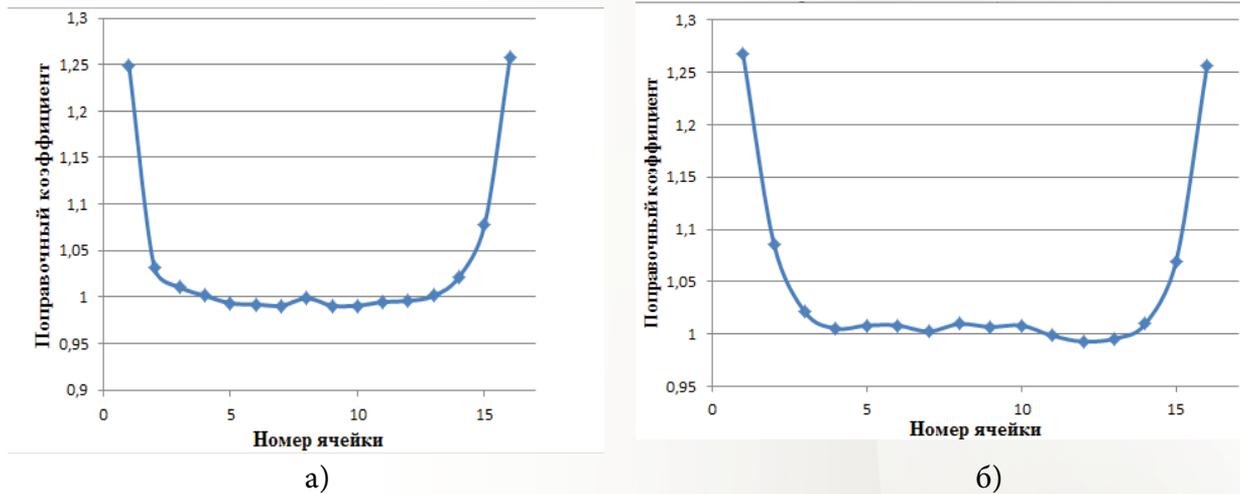


Рис. 8. Значения поправочных коэффициентов для каждой ячейки фотодиодных линеек S4111-16R:  
 а) фотодиодная линейка № 1 со светофильтром BPF 890-40;  
 б) фотодиодная линейка № 2 со светофильтром BPF 1000-40

**С. Проверка работоспособности ОЭП в условиях, приближенных к реальным**

Проверка работоспособности ОЭП в условиях, приближенных к реальным, осуществлялась при помощи установки для проведения взрывов угле-метано-воздушных

смесей [16]. Все испытания проводились по методике, представленной в [17].

Изменение размеров очагов возгорания во времени от начала поджига для пропано-воздушной смеси при соотношении воздух / пропан — 10 / 1 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Диаметр очага возгорания пропано-воздушной смеси в сантиметрах

№ опыта	Время от начала поджига, мс														
	7,5	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	37,5	50	62,5	75	87,5	100	110
1	6	8	9	10	11*	12	13	14	18	24	30	36	42	48	54
2	5	6	7	8	9	10*	11	12	15	20	28	34	38	46	50
3	-	3	4	5	6	7	7	8	11*	15	18	21	25	28	32
4	7	9	10	11*	12	13	14	15	19	22	28	32	37	41	46
5	6	7	8	9	10*	11	12	14	16	21	39	36	40	50	

Изменение размеров очагов возгорания во времени от начала поджига для угле-пропано-воздушной смеси при соотношении воздух / пропан — 10 / 1 представлены в таблице 2.

Таблица 2

Диаметр очага возгорания угле-пропано-воздушной смеси в сантиметрах

№ опыта	Время от начала поджига, мс														
	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5	35	
1		5	6	10*	15	20	27	33							
2	2	3	5	7	10*	12	14	15	17	20	22	25	29	36	
3	3	4	6,5	9,5*	13,5	16	19	20	23	27	30	34	39	49	
4	2	4	6	7	10*	12	15	17	19	22	25	29			
5	3	5	7	10*	14	17	19	21	23	26	29	31	37	46	

\* затемненными ячейками в таблицах 1–2 выделены диаметры очага возгорания, при которых ОЭП выдал сигнал тревоги на взрывоподавляющее устройство

В опытах без угольной пыли ОЭП генерировал сигнал тревоги на очаг возгорания диаметром 10–11 см, с угольной пылью 9–10 см, что объясняется более высокой излучательной способностью очага горения, содержащего угольную пыль, по сравнению с излучательной способностью горения пропана.

Частицы угольной пыли имели размер менее 100 мкм. Их наличие приводило к большей скорости горения горючей смеси (до 7 м/с, без угольной пыли — 2,5 м/с) [17–18].

### Вывод

В результате проделанных испытаний был разработан и изготовлен лабораторный образец оптико-электронного прибора определения местоположения начальной стадии развития горения в газодисперсных системах.

Проведенные лабораторные исследования позволили получить следующие характеристики ОЭП:

- неоднородность чувствительности приемников излучения S4111-16R достигает 25 % на крайних ячейках. В код программы внесены поправочные коэффициенты для уменьшения влияния неоднородности на работу ОЭП;
- угловое поле ОЭП  $2\omega = 9,8^\circ$ ;
- погрешность определения координат  $\delta = 7,8$  %, при вероятности  $P = 0,99$ ;
- диаметр очага возгорания, на который срабатывает ОЭП, для угле-пропано-воздушных и пропано-воздушных смесей — 9–11 см.

Полученные данные позволяют судить о возможности применения разработанного ОЭП в газодисперсных системах для обнаружения начальной стадии горения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование цветового пирометрического метода для построения датчика пожарной сигнализации / Е.В. Сыпин и др. // Электронный журнал «Исследовано в России». — 2003. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/158.pdf> (дата обращения: 12.02.2017).
2. Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив / В.В. Померанцев, С.Л. Шагалова, В.А. Резник и др. — Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1978. — 131 с.
3. Захаренко Д.М. Проблемы раннего обнаружения очагов пожаров и взрывов угольной пыли // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: материалы Всерос. науч.-практ. конф. — Красноярск, 2000. — С. 141–149.
4. Пат. 2109345 Российская Федерация, МПК G 08 B 17/12. Пирометрический датчик пожарной сигнализации / Леонов Г.В., Станкевич Ю.Л., Каширин С.И.; заявитель и патентообладатель Бийский технологический ин-т Алтайского Гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова. — № 95117261/12; заявл. 10.10.1995; опубл. 20.04.1998. — Бюл. № 11. — 4 с.
5. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные системы измерения температуры. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 248 с.
6. Сыпин Е.В. Оптико-электронный прибор обнаружения начальной стадии развития взрыва в газодисперсных системах: дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук: 05.11.13; защищена 28.05.2007; утв. 14.12.2007. — Барнаул, 2007. — 144 с.
7. Пат. 2318242 Российская Федерация, МПК G 08 B 17/12. Пирометрический датчик координат очага возгорания / Сыпин Е.В. и др.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. — № 2006137378/09; заявл. 23.10.06; опубл. 27.02.08.
8. The ignition center coordinate gauge on CCD linear sensors // International workshops and tutorial on electron devices and materials EDM'2006: workshop proceedings. — Novosibirsk: NSTU, 2006. — P. 103–106.
9. Павлов А.Н. Оптико-электронная система определения трехмерных координат очага взрыва в газодисперсных системах на начальной стадии: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.11.13. — Бийск, 2010. — 134 с.
10. Designing of optical system with cylindrical lenses of ignition center coordinates pyrometric sensor / Terentiev S.A. et al. // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and

electron devices EDM`2010: Conference proceedings. — Novosibirsk: NSTU Publishing polygraph center, 2010. — P. 430–433.

11. Пат. 2459269 Российская Федерация, МПК7 G 08 В 17/12. Пирометрический датчик координат очага возгорания с цилиндрическими линзами / Терентьев С.А. и др.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. — № 2011109990/08; заявл. 16.03.2011; опубл. 20.08.2012.

12. Проектирование оптической системы с цилиндрическими линзами пирометрического датчика определения координат очага возгорания / Терентьев С.А. и др. // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2010. — № 1. — С. 126–132.

13. Designing of optical system with cylindrical lenses of ignition center coordinates pyrometric sensor / S.A. Terentiev et al. // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM`2010: Conference proceedings. — Novosibirsk: NSTU Publishing polygraph center, 2010. — P. 430–433.

14. Development of graduation methods of the ignition center coordinates pyrometric gauge with cylindrical lenses / Terentiev S.A. et al. // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM`2009: Conference proceedings. — Novosibirsk: NSTU Publishing polygraph center, 2009. — P. 343–345.

15. Installation For Definition of CCD Linear Sensors Non-uniform Sensitivity / Terentiev S.A. et al. // International Siberian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM`2007: Workshop Proceedings. — Novosibirsk: NSTU, 2007. — P. 350–353.

16. Determination of Heterogeneity of Cells Sensitivity of Leaner Photodiode Arrays / Terentiev S.A., Sypin E.V., Gerasimov D.A. // 15th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2014: Conference proceedings. — Novosibirsk: NSTU, 2014. — P. 280–282.

17. Установка для экспериментального исследования систем взрывоподавления / А.И. Сидоренко, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин // Датчики и системы. — 2013. — № 10. — С. 27–31.

18. Detection Time of the Explosion Initial Stage by the Electro-optical System with Cylindrical Lenses / Terentiev S.A. et al. // 16th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2015: Conference proceedings. — Novosibirsk: NSTU, 2015. — P. 314–316.

---

**UDC 622.8:53.08**

**© S.A. Terentiev, Ye.V. Sypin, Lee Khi Un, 2018**

**S.A. Terentiev**

Senior Lecturer

Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk

e-mail: terser@list.ru

**Ye.V. Sypin**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk

e-mail: sev@bti.secna.ru

**Lee Khi Un**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Academic secretary

JSC «NC VostNII», Kemerovo

e-mail: leeanatoly@mail.ru

## **OPTOELECTRONIC DEVICE FOR DETERMINING THE LOCATION OF THE INITIAL STAGE OF COMBUSTION IN GAS-DISPERSION SYSTEMS**

*The development of optoelectronic device (OED) determining the location of the initial stage combustion in gas-dispersion systems is presented. The information about laboratory testings is given. The OED characteristics are determined. The OED working capacity is proved.*

Key words: OPTOELECTRONIC DEVICE, COMBUSTION INITIAL STAGE, OPTICAL SYSTEM, COMPUTATIONAL SIMULATION, LABORATORY TESTING.

### **REFERENCES**

1. Sypin E.V. Ispolzovanie tsvetovogo pirometricheskogo metoda dlya postroeniya datchika pozharnej signalizatsii (Chromatic pyrometric technique for fire-warning sensor creation). Elektronnyj zhurnal «Issledovano v Rossii» = Investigated in Russia. 2003. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/158.pdf> (accessed data: 12.02.2017).

2. Pomerancev V.V., Shagalova S.L., Reznik V.A. Samovozgoranie i vzryvy pyli naturalnyh topliv (Spontaneous ignitions and dust explosions of natural fuel). L.: Energiya. Leningradskoe otdelenie, 1978. 131 p.

3. Zakharenko D.M. Problemy rannego obnaruzheniya ochagov pozharov i vzryvov ugolnoy pyli. Problemy ispolzovaniya kansko-achinskikh ugley na elektrostantsiyakh (Problems of early detection of ignition centers and dust explosions). Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. Krasnoyarsk, 2000. pp. 141–149.

4. Leonov G.V., Stankevich Yu.L., Kashirin S.I. Pirometricheskii datchik pozharnej signalizatsii (Pyrometric fire-warning sensor). Pat. 2109345 RU, MPK G 08 B 17/12. № 95117261/12. Applied: 10.10.1995. Published 20.04.1998. Bulletin № 11. 4 p.

5. Poskachey A.A., Chubarov E.P. Optiko-elektronnye sistemy izmereniya temperatury (Optoelectronic systems for temperature measurement). 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 1988. 248 p.

6. Sypin E.V. Optiko-elektronnyy pribor obnaruzheniya nachalnoy stadii razvitiya vzryva v gazodispersnykh sistemakh (Optoelectronic device for determining the location of the initial stage of combustion in gas-dispersion systems: in candidacy for a doc. degree). Dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk: 05.11.13; zashchishchena 28.05.2007; utv. 14.12.2007. Barnaul, 2007. 144 p.

7. Sypin E.V. Pirometricheskii datchik koordinat ochaga vozgoraniya (Pyrometric sensor for ignition center coordinates). Pat. 2318242 RU, MPK7 G 08 B 17/12. № 2006137378/09. Applied: 23.10.06. Published 27.02.08.

8. Terentiev S.A. The ignition center coordinate gauge on CCD linear sensors. International workshops and tutorial on electron devices and materials EDM'2006: workshop proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2006. pp. 103–106.

9. Pavlov A.N. Optiko-elektronnaya sistema opredeleniya trekhmernykh koordinat ochaga vzryva v gazodispersnykh sistemakh na nachalnoy stadii (Optoelectronic systems for determining the three-dimensional coordinates of ignition centers in gas-dispersion systems location of the initial stage of combustion in gas-dispersion systems: in candidacy for a cand. degree). Dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk: 05.11.13. Biysk. 2010. 134 p.

10. Terentiev S.A. Designing of optical system with cylindrical lenses of ignition center coordinates pyrometric sensor. International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU Publishing polygraph center. 2010. pp. 430–433.

11. Terentiev S.A. Pirometricheskii datchik koordinat ochaga (Pyrometric sensor with cylindrical lenses for ignition center coordinates). Pat. 2459269 RU, MPK7 G 08 B 17/12. № 2011109990/08. Applied: 16.03.2011. Published 20.08.2012.

12. Terentiev S.A. Proektirovanie opticheskoy sistemystilindricheskimi linzami pirometricheskogo

datchika opredeleniya koordinat ochaga vozgoraniya (Projecting of optical system with cylindrical lenses of pyrometric sensor of combustion point position determination). Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti = Industrial Safety. 2010. № 1. pp. 126–132.

13. Terentiev S.A. Designing of optical system with cylindrical lenses of ignition center coordinates pyrometric sensor. International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM`2010: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU Publishing polygraph center, 2010. pp. 430–433.

14. Terentiev S.A. Development of graduation methods of the ignition center coordinates pyrometric gauge with cylindrical lenses. International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM`2009: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU Publishing polygraph center, 2009. pp. 343–345.

15. Terentiev S.A. Installation For Definition of CCD Linear Sensors Non-uniform Sensitivity. International Siberian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM`2007: Workshop Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2007. pp. 350–353.

16. Terentiev S.A., Sypin E.V., Gerasimov D.A. Determination of Heterogeneity of Cells Sensitivity of Linear Photodiode Arrays. 15th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2014: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2014. pp. 280–282.

17. Sidorenko A.I., Pavlov A.N., Sypin E.V. Ustanovka dlya eksperimentalnogo issledovaniya sistem vzryvopodavleniya (The facility for experimental investigation of systems of the suppression of an explosion). Datchiki i sistemy = Sensors & Systems. 2013. № 10. pp. 27–31.

18. Terentiev S.A. Detection Time of the Explosion Initial Stage by the Electro-optical System with Cylindrical Lenses. 16th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2015: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2015. pp. 314–316.