**ВЫБОР ДАТЧИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ
ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**А.С. Юрченко¹, И.Н. Лукьяненко¹,
И.И. Царук¹, А.К. Малышева¹, Л.А. Ничкова², Л.И. Осадчая²**

¹Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору
по Республике Крым и г. Севастополю

²Севастопольский государственный университет,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: nichkova@sevsu.ru; lila1809@mail.ru

Взрывопожароопасные объекты в законодательном порядке защищаются локальными быстродействующими автоматическими системами наряду с другими мерами защиты. Однако не всегда удается достичь желаемого результата по причине несовершенности этих систем: низкой эффективности, недостаточной надежности, высокой инерционности. В данном исследовании предпочтение отдается выбору датчиков излучения, воспринимающих энергию нагретых тел, в данном случае пламени, и преобразующих её в электрический сигнал. Поскольку эта энергия рассеивается в канале связи от пламени до датчика и в самом датчике, то приводится аналитическое описание этих потерь и энергии излучения в целом, что очень важно для оценки чувствительности датчика. От этого элемента в значительной мере зависят инерционность и быстродействие всей системы.

Ключевые слова: взрывопожароопасные объекты, пламя, энергия излучения, рассеяние энергии, датчик, порог срабатывания датчика, чувствительность и нечувствительность датчика.

Поступила в редакцию: 07.04.2021. После доработки: 19.04.2021.

Введение. Доля взрывов и пожаров в общем количестве аварий составляет более 90%. Ущерб от пожаров во всем мире, в том числе и в России, остается большим, при этом наблюдается тенденция его неуклонного роста. Нередко пожары и взрывы уносят ничем не возместимые человеческие жизни.

Анализ динамики развития взрыва и пожара свидетельствует о том, что наиболее успешная борьба с огнем достигается в первоначальный период его возникновения. Поэтому системы контроля и защиты пожаровзрывоопасных объектов должны быть автоматическими, быстродействующими, малоинерционными, локального действия. Последнее свойство снижает сложность структуры систем контроля и защиты объектов и их стоимость.

Однако имеющиеся в настоящее время различного типа автоматические установки (АУП) (спринклерные, дренчерные, водяного, пенного тушения) имеют ряд недостатков. Это прежде всего высокая инерционность сраба-

тывания автоматических установок, что снижает их эффективность даже при использовании современных огнетушащих веществ. Кроме того, громоздкость, сложность обслуживания, невзрывозащитное исполнение, низкая надежность имеющихся установок ограничивают их применение и эффективность действия.

В настоящее время при проектировании систем взрывопожарозащиты не выполняется оценка надежности расчетным способом и их структурная оптимизация. В инструкции или отчете указывается надежность 0,999 в соответствии с требованиями стандарта [1] или близкая к этому, а оптимизация ограничивается позицией «выполнен оптимальный вариант». При этом игнорируется общее понятие о том, что оптимизация предусматривает критерий оптимизации в виде однофакторной или многофакторной функциональной зависимости, численно стремящейся к max или min. Это происходит потому, что отсутствует нормативная методика для разработчиков и проектировщиков

средств пожарной защиты, а для разработки такой методики отсутствуют необходимые исследования.

В данной работе проанализированы возможные варианты датчиков в зависимости от условий их применения в системах взрывопожарозащиты. Все типы датчиков классифицируются по характерным признакам. Представляется наиболее целесообразной классификация по воспринимаемым ими параметрам. По этому признаку датчики делятся на: тепловые, реагирующие на изменение температуры контролируемой среды под воздействием возникшего загорания; датчики давления, воспринимающие изменение давления продуктов горения или скорость нарастания давления; датчики излучения, воспринимающие энергию излучения нагретых тел или пламени и преобразующие ее в электрический сигнал; датчики концентрационные, реагирующие на изменение концентрации продуктов горения (дыма или газов); датчики ионизационные, основанные на использовании ионизирующего эффекта некоторых видов излучения. Каждый из перечисленных датчиков обладает присущей ему инерционностью и быстродействием, что очень важно в эффективности взрывопожарозащиты.

Материалы и методы. Из перечисленных выше типов датчиков с точки зрения эффективности предпочтение отдается датчикам излучения. Они относятся к бесконтактным датчикам температур. Принцип действия их основан на восприятии и преобразовании в электрический сигнал энергии теплового излучения. Этот тип датчиков имеет неограниченную область применения.

Тепловое излучение тел характеризуется спектральной плотностью E_χ , которая зависит от абсолютной температуры T и выражается формулой Планка

$$E_\chi = \varepsilon_\chi \frac{C_1 \chi^{-5}}{e^{-C_1/\chi T} - 1} = c_1 \chi^{-5} (e^{-C_1/\chi T} - 1), \quad (1)$$

где ε_χ – относительная лучеиспускательная способность тела в данном спек-

тре ($0 < \varepsilon_\chi < 1$); C_1 и C_2 – постоянные ($C_1 = 37,03 \cdot 10^{-17}$ Дж·м²/с; $C_2 = 1,432 \cdot 10^{-2}$ м·град); χ – длина волны.

Из выражения (1) видно, что спектральная плотность зависит от длины волны при различных значениях температур. С повышением температуры максимум излучаемой энергии смещается в сторону более коротких волн. Это смещение подчиняется закону Голицина-Вина

$$\chi = \frac{2898}{T}, \quad \text{мкм}. \quad (2)$$

Тепловое излучение, являясь видом электромагнитного излучения, занимает определенную область в частном диапазоне электромагнитных колебаний. Эта область охватывает ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный участок спектра с длинами волн примерно от 420 мкм до $5 \cdot 10^{-3}$ мкм.

Полная энергия излучения реальных тел E_p выражается законом Стефана-Больцмана

$$E_p = \varepsilon_T \sigma T^4, \quad (3)$$

где σ – коэффициент излучения абсолютно черного тела ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/м²·град⁴); ε_T – коэффициент черноты для реальных тел.

Таким образом, для измерения или регистрации температуры можно брать полную энергию излучения, используя закон Стефана-Больцмана, или излучение в определенном участке спектра на основании закона Планка. Наибольшее применение в технике обнаружения пламени находит метод регистрации ультрафиолетового или инфракрасного излучения. Обнаружение пламени по полному излучению и излучению видимых лучей в большинстве случаев затруднительно из-за высокого уровня фона, создаваемого источниками искусственного или естественного освещения.

Из терморезекторных приемников теплового излучения все большее применение находят болометры. Они бывают металлические, на основе черни золота, сурьмы или никеля; полупроводниковые, выполненные из окислов метал-

лов; диэлектрические, основанные на зависимости диэлектрической проницаемости некоторых диэлектриков от температуры. Наибольшей чувствительностью при малой инерционности обладают полупроводниковые болометры.

Из металлических приемников лучшими характеристиками обладают болометры с чувствительным элементом из черни золота, имеющие при чувствительности 4,35 В/Вт и пороге чувствительности 10^{-7} Вт, постоянную времени, равную 3,8 мс.

Приведенные выше формулы (1, 2, 3) учитывают энергию в своем диапазоне излучения. С незначительной погрешностью они применимы к датчикам, срабатывающим на ближнюю и среднюю части спектра инфракрасного излучения, так как мощность энергии излучения при $\chi < 0,4$ мкм ничтожно мала [2], а при $\chi > 25$ мкм, по нашим оценкам, не превышает 1% мощности энергии излучения всего спектра при достаточно высоких температурах, которые свойственны пламени.

В случае использования узкой части спектра в пределах длин волн от χ_1 до χ_2 , например при применении в датчиках фильтров, «вырезающих» часть спектра, плотность энергии излучения, воспринимаемой датчиком, представляет собой интегральную величину и исходная формула (3) должна записываться с учетом зависимости которая может быть определена согласно закону Планка [2]

$$E_p = \int_{\chi_1}^{\chi_2} E(\chi) d\chi. \quad (4)$$

Результаты исследования. Величина рассеяния (потерь для датчика) лучистой энергии в канале связи определяется коэффициентом $\epsilon_{\text{КС}}$, зависящим от физического состояния промышленной атмосферы, находящийся между источником излучения и датчиком.

На основании теории оптических явлений в атмосфере, разработанной С.И. Вавиловым, В.В. Шулейкиным, И.А. Хвостиковым, Л.П. Лазаревым и др., можно считать, что рассеяние (потери) лучистой энергии в промышленной атмосфере может происходить в ре-

зультате молекулярного поглощения, молекулярного рассеяния и рассеяния инородными частицами, взвешенными в атмосфере. Соответственно коэффициент потерь лучистой энергии в атмосфере равен произведению трех коэффициентов

$$\epsilon_{\text{КС}} = \epsilon_{\text{мп}} \epsilon_{\text{мр}} \epsilon_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Молекулярное поглощение энергии вызывается колебаниями заряда или дипольного момента движущейся молекулы. Особенно интенсивно поглощается лучистая энергия на частотах, равных или кратных собственной частоте колебательных или вращательных движений молекулы (резонансное поглощение).

Явление поглощения инфракрасного излучения верхними слоями околослойной атмосферы достаточно полно освещены в монографиях В.В. Шулейкина, К.Я. Кондратьева, Л.П. Лазарева, В.Е. Зуева и др. [3, 4]. Из исследований, проведенных этими авторами, можно сделать заключение, что в промышленной атмосфере с нормированной загрязненностью при небольшой длине канала связи (порядка нескольких метров) значением молекулярного поглощения можно пренебречь.

Однако для ряда контролируемых объектов существуют специфические условия, такие, как наличие значительных концентраций углекислого газа, паров воды, кислот, паров углеводородных соединений и мелкодисперсной пыли, которые значительно поглощают инфракрасные лучи. Такие условия могут возникать в герметичных технологических аппаратах и емкостях.

В этом случае для определения поглощения энергии применим закон Бугера-Ламберта-Бэра. При условии параллельности пучка инфракрасных лучей однородности канала связи и при узком диапазоне частот используемого излучателя выражение этого закона можно записать в виде

$$\Phi_{\text{об}} = \Phi_{\text{из}} e^{-\alpha c L}, \quad (6)$$

где α – константа, зависящая от свойств вещества и длины волны излучения;

c – концентрация поглощённого компонента; L – длина канала связи.

Поскольку некоторая часть энергии теряется в канале связи и в самом датчике, то входной сигнал, воспринимаемый датчиком, будет меньше потока излучения на величину потерь, т.е.

$$\Phi_{\text{вх}} = \Phi_{\text{из}} \varepsilon_{\text{кс}} \varepsilon_{\text{д}}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{\text{кс}}$ – коэффициент потерь в канале связи; $\varepsilon_{\text{д}}$ – коэффициент потерь в датчике, зависящий от концентрации и атмосферы датчика.

Сравнивая (6) с (7) имеем

$$\Phi_{\text{уп}} = \Phi_{\text{уп}} e^{-\alpha c L}. \quad (8)$$

Тогда в общем случае коэффициент рассеяния (потерь) инфракрасной энергии в результате ее молекулярного рассеяния равен

$$\varepsilon_{\text{мп}} = e^{-\alpha c L}. \quad (9)$$

Флуктуации плотности приводят к изменению показателя преломления среды вдоль канала связи. Это явление имеет существенное значение при больших (порядка несколько километров) канала связи. В условиях работы системы локального пожаротушения длина канала связи небольшая, и поэтому при однородной атмосфере на этом расстоянии практически $\varepsilon_{\text{м.п.}} \rightarrow 1$.

Рассеяние энергии излучения инородными частицами зависит от состояния атмосферы канала связи. Промышленная атмосфера содержит в себе мелкие инородные частицы в виде мелкодисперсной минеральной пыли, копоти, конденсированной жидкости и др. Такие частицы, содержащиеся в атмосфере во взвешенном состоянии, носят общее название аэрозолей. Присутствие аэрозолей в канале связи значительно затрудняет прохождение инфракрасного излучения и вызывает его потери за счет отражения лучей от поверхностей аэрозольных частиц.

Теория рассеяния крупными частицами, обладающими свойствами диэлектриков, которыми преимущественно яв-

ляются аэрозоли, разработана академиком В.В. Шулейкиным. Им предложена следующая зависимость величины рассеяния потока энергии Φ_s от крупности частиц аэрозолей [4]

$$\Phi_s \chi_g \sim 1/\chi_p. \quad (10)$$

В.В. Шулейкин доказал, что с увеличением размера частиц показатель p снижается и при диаметре их 1–1,2 мкм становится равным нулю. В этом случае величина рассеянной инфракрасной энергии не зависит от частоты ее излучения.

Аналитическое определение коэффициента потерь энергии излучения в промышленной атмосфере весьма затруднительно. Поэтому приходится прибегать к опытным оценкам в конкретных условиях.

Экспериментальные исследования энергии излучения пламени и ее потерь можно производить с помощью спектрометров по абсолютным характеристикам в зависимости от длины волны излучения. Однако постановка таких экспериментов в промышленных условиях представляет определенную сложность как в применении необходимых приборов, так и в методике.

Имеется возможность экспериментального исследования потерь энергии излучения пламени по косвенным характеристикам более простых и удобных в применении измерителей, например, по выходному напряжению болометрического датчика, если оно имеет пропорциональную зависимость от энергии излучения.

В этом случае напряжение выходного сигнала датчика $U_{\text{вых}}$ изменяется от максимального значения U_{max} при наибольшей энергии излучения до минимального значения U_{min} при наименьшей энергии излучения. При отсутствии излучения, U_{min} равняется величине внутреннего шума системы датчика $U_{\text{ш}}$. Датчик будет устойчиво работать, т.е. выдавать необходимый и достаточный сигнал для срабатывания системы только при определенном пороговом для данного датчика значении выходного полезного сигнала $U_{\text{п}}$. Величина полезного сигнала яв-

ляется постоянной, независимой от величины энергии излучения и расстояния ее передачи.

Устойчивость нормальной работы системы измерения характеризуется отношением величины шума и полезного сигнала

$$\eta = \frac{U_{ш}}{U_n} = \frac{U_{min}}{U_n}. \quad (11)$$

Для обеспечения надежности работы системы измерения, отсутствия ее ложных срабатываний и достоверности данных эксперимента необходимо, чтобы

полезный сигнал превышал внутренний шум примерно на один порядок.

Коэффициент потерь энергии излучения определяется отношением величины выходного сигнала к величине максимального сигнала датчика

$$\varepsilon = \frac{U_{вых}}{U_{max}}. \quad (12)$$

Исследование энергии излучения пламени производится по предлагаемой схеме, приведенной на рис. 1.

Рис. 1. Схема исследования энергии излучения пламени
1 – источник (пламя); 2 – теплонепроницаемый экран; 3 – окно излучения;
4 – болометрический датчик ОБК-4К; 5 – станция

Fig. 1. Diagram of flame radiation energy study

1 – source (flame); 2 – heat-tight screen; 3 – window of radiation;
4 – bolometric sensor OBK-4K; 5 – station

Источником излучения является стационарное пламя различных горючих веществ, энергия излучения которого распространяется к датчику через фиксированное отверстие в теплонепроницаемом экране в произведенной воздушной среде. Датчик устанавливается на различном расстоянии (обусловленном методикой) от пламени, что позволяет определять потери энергии излучения по расстоянию.

Чувствительным элементом датчика является металлический болометр ОПБ-4К, воспринимающий поток инфракрасного излучения, усиленный отражательным зеркалом.

Преобразование теплового излучения

в электрический сигнал производится мостом постоянного тока, в плечо которого включен болометр. Поскольку усиление постоянного сигнала затруднительно, то в схему включен преобразователь, преобразующий постоянный сигнал в переменный. Далее сигнал увеличивается усилением переменного тока. Для согласования выходного сопротивления моста выходным сопротивлением усилителя в схему включен эмиттерный повторитель.

Усилитель подключен к устройству, задающему порог срабатывания датчика. Пороговое устройство, в свою очередь, управляет теристорным ключом, позволяющим включить цепь питания

исполнительного органа. Работа датчика осуществляется от индивидуального блока питания.

Блок схема, электрическая схема, принцип действия болометрического датчика, результаты экспериментального исследования дальней публикации.

Заключение. В статье выполнены исследования энергии излучения пламени, проведен выбор датчиков излучения, воспринимающий энергию нагретых тел. Данная энергия рассеивается в канале связи от пламени до датчика и в самом датчике, кроме того дано аналитическое описание этих потерь и энергии излучения в целом, что очень важно для оценки чувствительности датчика. От этого элемента в значительной мере зависят инерционность и быстродействие всей системы. Представленный материал имеет большое значение для органов государственной службы в области пожарной безопасности и проектно-конструкторских организаций, и обращает особое внимание проблеме усовершенствования автоматических локальных средств взрывопожарозащиты. Эти усовершенствования должны быть направлены, в первую очередь, на снижение инерционности, повышение быстродействия, надежности систем и устройств локального действия, исходя из первоначальных этапов развития взрыва и пожара [5, 6, 7]. Для конструкторов и проектировщиков должна быть разра-

ботана нормативная методика, лимитирующая основные эксплуатационные параметры создаваемых средств взрывопожарозащиты и условия их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Справочник. Пожарная безопасность* / А.Н. Баратов, Б.Н. Иванов, А.Я. Корольченко [и др.] М.: Химия. 1987. 270 с.
2. *Лазарев Л.П.* Инфракрасные и световые приборы. М.: Машиностроение. 1970. 340 с.
3. *Зуев В.Е.* Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. Изд-во Сов. радио. 1966. 318 с.
4. *Шулейкин В.В.* Физика моря. Ч. 6-8: Оптика моря. Изд-во Наука. М., АН СССР. 1953. 510 с.
5. *Сефриков В.В.* Автономная автоматическая противопожарная защита промышленных сооружений. Изд-во Вища школа. 1979. 187 с.
6. *Сефриков В.В. Ничков Л.А., Сефриков И.В., Швецова В.И.* Оптимизация структур эргатических систем контроля и защиты пожаровзрывоопасных объектов. Изд-во Лань. 2019. 350 с.
7. *Захаренко Д.М.* Проблемы раннего обнаружения очагов пожара, тления, взрыва угольной пыли // Проблемы использования канскоачинских углей на электростанциях. 2000. С. 141–150.

SELECTION OF RADIATION SENSOR FOR MONITORING SYSTEMS OF EXPLOSION AND FIRE HAZARDOUS OBJECTS

Yurchenko A.S.¹, Lukyanenko I.N.¹,
Tsaruk I.I.¹, Malysheva A.K.¹, Nychkova L.A.², Osadchaya L.I.²

¹Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in the Republic of Crimea and the city of Sevastopol

²Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

Explosion and fire hazardous objects are legally protected by local fast-acting automatic systems along with other protection measures. However, it is not always possible to achieve the desired result due to the imperfection of these systems: low efficiency, insufficient reliability, high inertia. In this study, preference is given to the selection of radiation sensors that perceive the energy of heated bodies, in this case a flame, and convert it into an electric signal. Since this energy is dissipated in the communication channel

from the flame to the sensor and in the sensor itself, an analytical description of these losses and radiation energy in general is given, which is very important for assessing the sensitivity of the sensor. The inertia and speed of the entire system largely depend on this element.

Keywords: fire and explosion hazardous objects, flame, radiation energy, energy dispersion, sensor, threshold of operation of the sensor, sensitivity and insensitivity of the sensor.

REFERENCES

1. Spravochnik. Pozharnaya bezopasnost, A.N. Baratov, B.N. Ivanov, A.Ya. Korolchenko i dr. Moscow, *Himiya*, 1987, 270 p.
2. Lazarev L.P. Infekrasnyie i svetovyye priboryi. Moscow, *Mashinostroenie*, 1970, 340 p.
3. Zuev V.E. Prozhachnost atmosferyi dlya vidimyyh i infekrasnyih luchey: Izd-vo Sov. Radio, 1966, 318 p.
4. Shuleykin V.V. Fizika morya. Ch. 6-8: Optika morya. Izd-vo Nauka. Moscow, AN SSSR, 1953, 510 p.
5. Sevrikov V.V. Avtonomnaya avtomaticheskaya protivopozharnaya zaschita promysh-lennyih sooruzheniy. Izd-vo Vischa shkola, 1979, 187 p.
6. Sevrikov V.V. Nichkov L.A., Sevrikov I.V., Shvetsova V.I. Optimizatsiya struktur ergaticheskikh sistem kontrolya i zaschityi pozharovzryivoopasnyih ob'ektov. Izd-vo Lan, 2019, 350 p.
7. Zaharenko D.M. Problemyi rannego obnaruzheniya ochagov pozhara, tleniya, vzryiva ugolnoy pyili, *Problemyi ispolzovaniya kankskoachinskih ugley na elektrostantsiyah*, 2000, pp. 141–150.