

УДК 621.182:621.38

О.В. Вовна, І.С. Лактіонов

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра електронної техніки
E-mail: Vovna_Alex@ukr.net

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО СИСТЕМИ РАННЬОГО ВИЯВЛЕННЯ САМОЗАЙМАННЯ ПИЛОВУГІЛЬНИХ АЕРОЗОЛІВ В УМОВАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація

Вовна О.В., Лактіонов І.С. Обґрунтування вимог до системи раннього виявлення самозаймання пиловугільних аерозолів в умовах промислових підприємств. Розроблено математичну модель, яка враховує кінетичні параметри, динаміку температур і концентрацію пилових аерозолів, при аналізі одержаних результатів обґрунтовано сукупність вимог до вимірювальних каналів електронної системи раннього виявлення процесу самозагорання пилових аерозолів в умовах промислових підприємств.

Ключові слова: електронна система, обґрунтування вимог, пиловугільні аерозолі, поріг вибуховості, самозаймання, температура, промислові підприємства.

Загальна постановка проблеми. У теперішній час на промислових підприємствах енергетичного комплексу ризик виникнення пожежі із загибеллю персоналу знаходиться у діапазоні від 10^{-3} до 10^{-5} , а в умовах передремонтної підготовки технологічного устаткування ризик значно більший, що істотно перевищує вимоги діючих стандартів в області промислової та пожежної безпеки [1]. На даному етапі розвитку, не дивлячись на значний прогрес у всіх галузях науки і техніки, проблема енергетичного забезпечення розв'язується практично, як і сотні років тому. Основним способом отримання енергії є спалювання викопного палива, причому останнім часом є тенденція зростання споживання твердих видів такого палива. В Україні ця тенденція виявляється у вигляді збільшення споживання вугілля Донецького басейну, головним недоліком яких є висока пожежо- та вибухонебезпека.

Практично будь-яка ланка технологічного кола від видобутку вугілля до спалювання його у топці теплової електростанції в тій чи іншій мірі наражається на небезпеку пожежі або вибуху. Найгостріше ця проблема стоїть для теплоелектростанцій, де будь-яка подія, яка пов'язана із пожежею або вибухом, спричиняє за собою не тільки матеріальні втрати, але і приводить до значних соціальних наслідків. Боротьба з пожежами та вибухами на виробництвах, які пов'язано із використанням кам'яного вугілля, розвивається за декількома напрямками [2]:

– вдосконалення технологічних процесів добути та переробки кам'яного вугілля із скороченням часу контакту палива із атмосферним повітрям, зменшення пилоутворення, виключення потенційних джерел запалювання (перегріву);

– використання спеціального вибухозахищеного устаткування та спеціальних будівельних конструкцій;

– обробка кам'яного вугілля спеціальними речовинами, які інгібують процеси самозагорання та перешкоджають виникненню вибуху;

– проведення організаційно-технічних заходів на виробництві, які пов'язано перш за все, із зміцненням виробничої дисципліни;

– використання спеціальних електронних систем контролю за пожежо- та вибухонебезпечними ситуаціями.

Але, варто відзначити, що більшість заходів, які проводяться за цими напрямах, не дає необхідного ефекту. Так технологічно практично неможливо контролювати утворення просипання вугілля, а також виникнення небезпечних концентрацій вугільного пилу в момент запуску чи зупинки устаткування, при аваріях устаткування. Наявність у приміщенні великої кількості кабельних трас, зокрема силових, проведення зварювальних та інших робіт не гарантують, що не відбудеться перегрів або запалювання. Використання ж вибухозахищеного устаткування, конструкцій, а також застосування хімічних засобів призводить до значного збільшення матеріальних витрат та зниження рентабельності. Тому, не дивлячись на значне зміцнення виробничої дисципліни в енергетичних галузях, більшість аварійних ситуацій і, зокрема, пожеж та вибухів, відбувається з вини людини. Єдиним напрямом, розвиток якого може дати істотне підвищення рівня пожежної безпеки енергетичних підприємств у порівнянні із невеликими витратами на впровадження, є застосування електронних систем контролю пожежо- та вибухонебезпечних ситуацій.

Постановка задачі дослідження. Для своєчасного виявлення процесу самозагорання пилових аерозолів на промислових підприємствах, необхідно розробити та обґрунтувати структуру електронної системи, яка із достатнім ступенем вірогідності оповіщала б про виникнення пожежо- та вибухонебезпечної ситуації. Процеси спалаху (самозагорання), пожежі або вибухи можуть реєструватися за рядом факторів, якими ці явища супроводжуються. Загальним принципом роботи засобів виявлення вогнища запалювання (самозаймання) є вимірювання фізичних величин, які пов'язані або непов'язані із процесом теплообміну. Не дивлячись на існуюче різноманіття методів виявлення спалаху (самозагорання), проблема вибору вимірювального перетворювача спалаху (самозагорання) або тління вугільного пилу є актуальною.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичну модель виявлення процесу самозагорання пилевугільних аерозолів, яка дозволить врахувати: кінетичні параметри, динаміку температур та концентрацію вугільного пилу, а також конкуруючі ендотермічні процеси;
- провести моделювання процесу та проаналізувати одержані результати, на підставі чого сформулювати вимоги, як до окремих блоків, так і у цілому, до електронної системи, що розробляється;
- розробити та обґрунтувати структуру електронної системи раннього виявлення процесу самозагорання пилових аерозолів на промислових підприємствах.

Отже, виникає задача розробки математичної моделі, яка враховує достатньою мірою фізичні та хімічні властивості процесу самозагорання пилувугільних аерозолів, оскільки вирішення поставленої задачі має практичний інтерес.

Рішення задачі та результати дослідження. Семенов М.М. розробив першу кількісну теорію теплового запалювання (самозаймання). У ній джерела тепла описуються рівнянням Ареніуса, а тепловідведення – законом Ньютона. Умовою виникнення теплового спалаху є результат припинення існування стаціонарної задачі про протікання екзотермічної реакції в умовах тепловідведення [3]. Основні проблеми математичного моделювання процесу теплового вибуху пов'язано із представленням джерела тепловиділення (сильна нелінійність, наявність системи рівнянь у разі складних реакцій, труднощі моделювання утворення продуктів в ході реакції і т.п.) та описом процесу теплового переносу у разі складної гетерогенної системи. Багато органічних матеріалів внаслідок хімічної та енергетичної неоднорідності характеризуються різними значеннями кінетичних параметрів: Ігішев В.Г. приводить значення енергії активації від бурого вугілля до антрацитів 83 до 138 кДж/моль, Кисельов Я.С., Амельчугов С.П. для бурого вугілля – (45...70) кДж/моль. Аналогічні значення енергії активації набуто і іншими дослідниками. На думку деяких авторів, визначення умов виникнення пожеж та вибухів кам'яного вугілля за кінетичними параметрами процесу самонагрівання дозволяє прогнозувати ці умови виникнення при здобичі, транспортуванні, зберіганні та переробці

кам'яного вугілля [4]. Процеси самозагорання, тління та вибуху вугільного пилу супроводжуються наступними факторів:

- збільшення температури;
- зміна концентрації пиловугільної суміші (вигорання речовини);
- зміна оптичних властивостей пилегазового середовища;
- збільшення потужності оптичного випромінювання в інфрачервоному діапазоні.

У цій роботі увага надана вивченню тих фізичних параметрів, інерційність реєстрації яких порівняно мала. У роботі не досліджуються процеси, які пов'язано із хімічними властивостями середовища, оскільки час їх реєстрації залежить від процесів тепловагопереносу і, тому, не може відповідати вимогам раннього виявлення. Основним джерелом запалювання є вогнище самозагорання вугільного пилу, яке при «завихренні» може стати причиною, як пожежі, так і вибуху. До цього моменту процес самозагорання проходить через ряд стадій, кожна з яких розвивається за власними кінетичними закономірностями. Для визначення умов, при яких настає самозагорання, питання зміни температури та концентрації пилегазової суміші у часі є не таким значущим [5]. Але для розробки та обґрунтування вимог до електронної системи раннього виявлення процесу самозагорання пиловугільних аерозолів на промислових підприємствах, питання про динаміку температури та концентрації пилегазової суміші є важливим. Оскільки самозаймання відбувається не у певній точці, яка відповідає конкретному значенню температури та концентрації, а в діапазоні температур і концентрацій. На зміну даного діапазону вносять істотний вплив різні фактори: геометрія судини (камери), в якій розглядаються процеси горіння; елементний склад палива; зовнішні дії різної природи та ін.

Діапазон зміни температури пиловугільних аерозолів може бути знайдено із умови, що температура пилегазової суміші поступово збільшується, тобто $\frac{dT}{dt} > 0$. Введемо заміну

змінної $\theta = \frac{R \cdot T}{E}$, де R – універсальна газова постійна та E – енергія активації речовини.

Діапазон контрольованої температури може бути знайдений із наступного рівняння [5]:

$$f(\theta) = f_1(\theta) - f_2(\theta) = \frac{1}{\theta^2} \cdot e^{-\frac{1}{\theta}} - \alpha(\theta - \theta_c) = 0, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; $\theta_c = \frac{R \cdot T_c}{E}$ – температурний параметр стінок судини (камери).

Рівняння (1) має безліч рішень, але фізичне значення мають тільки ті рішення, при яких виконується умова: $\theta > 0$. Застосовуючи поняття теорії стійкості, можна сказати, що для виникнення процесу самозаймання, необхідне виконання двох умов [5]:

$$\begin{cases} f_1 = f_2; \\ \frac{df_1}{d\theta} = \frac{df_2}{d\theta}, \end{cases} \quad (2)$$

при використанні умов (2), знаходимо:

$$\begin{cases} \frac{1}{\theta^2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\theta}\right) = \frac{\alpha \cdot \theta^2}{1 - 2 \cdot \theta}; \\ 3 \cdot \theta^2 - (1 - 2 \cdot \theta_c) \cdot \theta + \theta_c = 0. \end{cases} \quad (3)$$

При аналізі першого рівняння системи (3), можна накласти обмеження на діапазон зміни θ . Оскільки ліва частина першого рівняння системи (3) завжди позитивна, то і права теж повинна бути позитивною. Отже: $\theta < \frac{1}{2}$. Аналіз другого рівняння системи (3) показує,

що воно має дійсне та комплексне коріння, фізичний сенс має тільки дійсне коріння. Розглянемо всі можливі випадки:

- обидва коріння комплексні – самозагорання неможливе, ні за яких умов;
- одне коріння комплексне, одне коріння дійсне – дійсне коріння є граничною точкою самозагорання;
- обидва коріння дійсні – як гранична точка самозагорання вибирається менше коріння.

Рішеннями другого рівняння системи (3) є функції:

$$\theta = \frac{1}{6} \cdot \left[(1 + 2 \cdot \theta_c) \pm \sqrt{(1 + 2 \cdot \theta_c)^2 - 12 \cdot \theta_c} \right]. \quad (4)$$

Менше коріння рівняння (4), тобто граничне значення параметру θ визначається залежністю із знаком «мінус»:

$$\theta_{\text{пр.}} = \frac{1}{6} \cdot \left[(1 + 2 \cdot \theta_c) - \sqrt{(1 + 2 \cdot \theta_c)^2 - 12 \cdot \theta_c} \right]. \quad (5)$$

Самозагорання неможливе, якщо підкорінний вираз функції (5) негативний, тобто θ_c задовольняє нерівностям:

$$0,134 < \theta_c < 1,866.$$

Здійснимо зворотний перехід від параметру θ за абсолютною температурою: $T = \frac{E \cdot \theta}{R}$. Температуру пиловугільного аерозолу, з урахуванням умови $\frac{R \cdot T}{E} < \frac{1}{2}$ та значень енергії активації наведено в [4], одержуємо, що температура знаходиться у діапазоні менше 5000 К (при мінімальному значенні енергії активації) та 8000 К (при максимальному значенні енергії активації), залежно від марки вугілля. З урахуванням того, що, визначимо температуру стінок судини (камери), при яких самозагорання неможливе: $1340 \text{ K} < T_c < 18640 \text{ K}$ (при мінімальному значенні енергії активації) та $2225 \text{ K} < T_c < 30099 \text{ K}$ (при мінімальному значенні енергії активації). Верхня межа нерівностей несе у собі чисто теоретичну інформацію, оскільки на практиці такі температури є недосяжними. Нижня температурна межа самозагорання пиловугільних аерозолів складає 1245 К [6]. Необхідною умовою для процесу теплового самозагорання є наявність достатнього ступеня концентрації вугільного пилу. Ця концентрація знаходиться у діапазоні між нижньою та верхньою концентраційною межею вибуховості. Мінімальну вибухонебезпечну концентрацію пиловугільних аерозолів, відповідно до [7], можна розрахувати за формулою:

$$C_{\text{min}} = \frac{8 \cdot 10^5}{Q},$$

де Q – теплота згорання вугілля, для вугілля Донецького басейну вона приблизно складає 24134 кДж/кг [8]. Одержуємо: $C_{\text{min}} = 33 \text{ г/м}^3$.

Максимальна вибухонебезпечна концентрація пиловугільних аерозолів, відповідно до [7], може бути знайдена за формулою:

$$C_{\text{max}} = \frac{1}{V_{\text{PY}}^0},$$

де V_{PY}^0 – теоретично необхідна кількість повітря для горіння 1 кг вугільного пилу у робочих умовах.

$$V_{\text{PY}}^0 = \frac{V^0 \cdot P_{\text{HY}} \cdot T_{\text{HY}}}{T_{\text{PY}} \cdot P_{\text{PY}}},$$

де V^0 – теоретично необхідна кількість повітря для горіння 1 кг вугільного пилу у нормаль-

них умовах, складає $8,8 \text{ м}^3/\text{кг}$; P_{HV} – тиск повітря у нормальних умовах, складає 101 кПа ; T_{HV} – температура повітря у нормальних умовах, складає 273 К ; T_{PV} – температура повітря у робочих умовах, складає 278 К ; P_{PV} – тиск повітря у робочих умовах, складає $98,9 \text{ кПа}$ [9].

Таким чином, теоретично необхідна кількість повітря для горіння 1 кг вугільного пилу у робочих умовах складає $9,1 \text{ м}^3/\text{кг}$. Одержуємо: $C_{\text{max}} = 110 \text{ г/м}^3$.

Під час реакції горіння концентрація вугільного пилу не залишається постійною, а змінюється із зростанням температури, згідно наступної залежності:

$$C(T) = \frac{C_0 \cdot T_0}{T},$$

де C_0 – початкова концентрація вугільного пилу, значення якої складає $C_{\text{max}} = 110 \text{ г/м}^3$; T_0 – початок відліку температури, який дорівнює нижній температурній межі самозагорання 1245 К .

Динаміку зміни концентрації пиловугільних аерозолів представлено на рис 1, яка простежує зміну у температурному діапазоні від 1245 К до 5000 К .

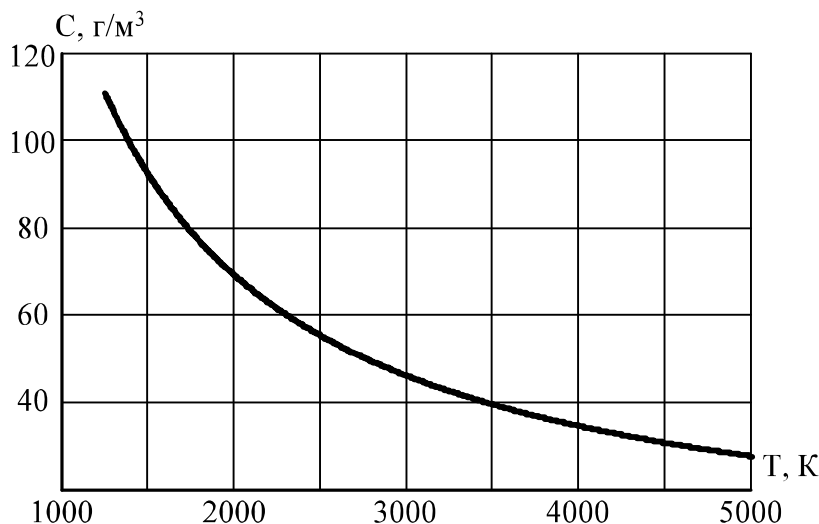


Рисунок 1 – Динаміка зміни концентрації пиловугільних аерозолів із зростанням температури

Виходячи із залежності, яку наведено на рис. 1, можна зробити наступний висновок, що на всьому температурному інтервалі концентрація пиловугільних аерозолів знаходиться у діапазоні між нижньою до верхньою концентраційними межами вибуховості, що говорить про необхідність проведення експрес-аналізу концентрації вугільного пилу.

Грунтуючись на одержаних даних про температурний діапазон пиловугільних аерозолів $T = (278...1245) \text{ К}$ та стінок судини (камери) $T_c = (278...1340) \text{ К}$, а також концентрації пиловугільних аерозолів $C = (10...110) \text{ г/м}^3$, можна вивести загальний вид залежності, яка дозволить із достатнім ступенем вірогідності відстежувати процеси самозагорання пиловугільних аерозолів в умовах промислових підприємств. Дана залежність має наступний вигляд:

$$P = f(T, T_c, C(T)),$$

де P – вірогідність виникнення процесу самозагорання пиловугільних аерозолів та відкладень.

На підставі одержаної залежності, проведено синтез структури електронної системи раннього виявлення самозагорання пиловугільних аерозолів в умовах промислових підприємств, узагальнену структурну схему якої наведено на рис. 2. До складу електронної системи входять наступні вимірювальні канали:

- вимірювальний канал температури (ВКТ) пилових аерозолів, з діапазоном вимірювання температури від 278 до 1245 К;
- вимірювальний канал температури стінок судини (камери), з діапазоном вимірювання температури від 278 до 1340 К;
- вимірювальний канал концентрації пилових аерозолів, з діапазоном вимірювання від 10 до 110 г/м³.

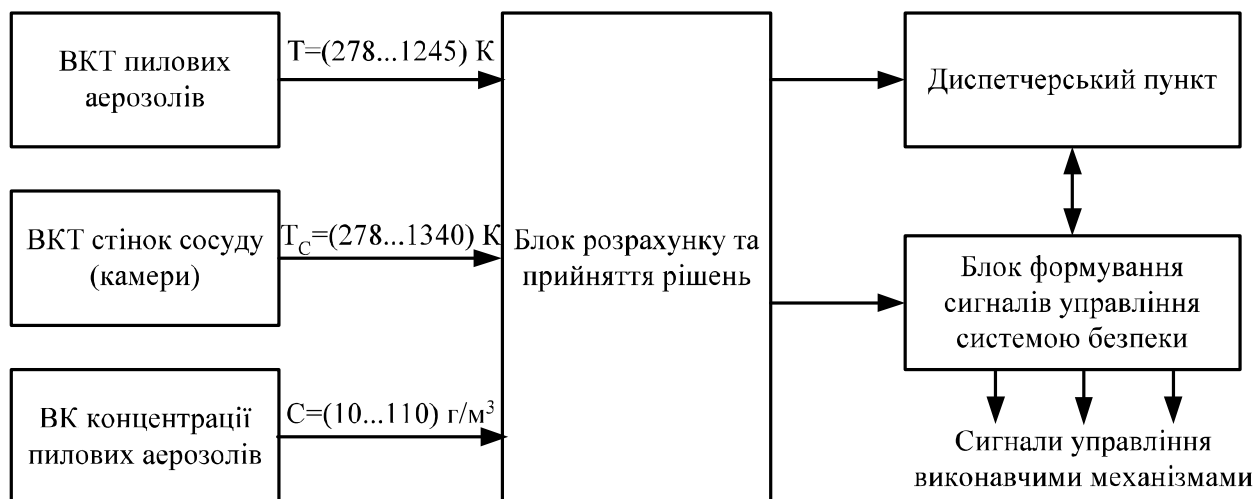


Рисунок 2 – Узагальнена структурна схема електронної системи виявлення процесу самозагорання пиловугільних аерозолів

Інформація про зміну параметрів, які контролюються, передається до блоку розрахунку та прийняття рішень. За отриманими значеннями параметрів температури пилових аерозолів, температури стінок судини (камери) та концентрації пилових аерозолів розраховується вірогідність виникнення самозагорання. Результати вимірювання основних параметрів у робочій зоні з результатами розрахунків передаються до диспетчерського пункту промислового підприємства. Робота вимірювальної системи здійснюється, як в автоматичному, так і в автоматизованому режимах. В автоматичному режимі при критичних значеннях вимірюваних параметрів електронна система формує рішення про відключення системи пилепідготовки. В автоматизованому режимі вимірювальна система видає рекомендації до диспетчерського пункту, який ухвалює необхідне рішення по коректуванню технологічного процесу.

Висновки.

1. Розроблено математичну модель виявлення процесу самозагорання пиловугільних аерозолів, яка враховує кінетичні параметри, динаміку температури, як пилового аерозолу так і температури стінок камери пилеприготування, концентрацію пилових аерозолів, а також конкуруючі ендометричні процеси.

2. Проведено математичне моделювання процесу самозагорання пиловугільних аерозолів різних типів та аналіз одержаних результатів, що дозволило поставити вимоги до вимірювальних каналів електронної системи, яка включає вимірювальні канали температури пилових аерозолів з діапазоном вимірювання від 278 до 1245 К, стінок судини (камери) пилеприготування – від 278 до 1340 К та концентрації пилових аерозолів з діапазоном вимірювання від 10 до 110 г/м³.

3. Розроблено узагальнену структуру електронної системи виявлення процесу самозагорання пиловугільних аерозолів в умовах промислових підприємств, яка дозволяє виявляти та відстежувати з достатнім ступенем вірогідності на ранніх стадіях процесу самозагорання пиловугільних аерозолів та відкладень в умовах промислових підприємств.

Література

1. О пожарной безопасности: федеральный закон от 21 декабря 1994. - № 69 – ФЗ.
2. Правила взрывобезопасности топливоподачи и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. Нормативные документы для тепловых электростанций и котельных. РД 153-34.1-03.352-99. РАО ЕЭС России. М., 2000.
3. Зебельдович Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зебельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе - М.: Наука, 1980. – 478 с.
4. Захаренко Д.М. Проблемы раннего обнаружения очагов пожаров, тления, взрывов угольной пыли / Д.М. Захаренко // Сибирский вестник пожарной безопасности. – 2000. – Вып. 4. – С. 36 – 47.
5. Пашков Л.Т. Основы теории горения: учебное пособие / Л.Т. Пашков. – М.: МЭИ (ТУ), 2002. – 125 с.
6. Система стандартов безопасности труда. Смеси взрывоопасные классификация и методы испытаний: ГОСТ 12.1.011-78*. - Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 14 сентября 1978 г. № 2509 срок введения установлен с 01.07.79.
7. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность / под ред. А.П. Баратова. -М.: Химия, 1987.-270 с.
8. Правила взрывобезопасности топливоподачи и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. Нормативные документы для тепловых электростанций и котельных: РД 153-34.1-03.352-99. РАО ЕЭС России. - М., 2000.
9. Хзмалян Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М. Хзмалян, Я.А. Коган. – М.: Энергия, 1976. – 288 с.

Надійшла до редакції:
01.03.2011

Рекомендовано до друку:
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.

Abstract

Vovna A.V., Laktionov I.S. Substantiation requirements for the system of early detection of spontaneous combustion of coal-fired aerosols in industrial enterprises. A mathematical model that takes into account the kinetic parameters, the dynamics of temperature and concentration of dust aerosols in the analysis of the results justified a set of requirements for measuring channel electronic system for early detection of spontaneous combustion of dust aerosols in industrial enterprises.

Keywords: *electronic system, support requirements, coal-fired spray threshold explosion, spontaneous combustion, temperature, industrial enterprises.*

Аннотация

Вовна А.В., Лактионов И.С. Обоснование требований к системе раннего обнаружения самовозгорания пылеугольных аэрозолей в условиях промышленных предприятий. Разработана математическая модель, которая учитывает кинетические параметры, динамику температур и концентрацию пылевых аэрозолей, при анализе полученных результатов обосновано совокупность требований к измерительным каналам электронной системы раннего обнаружения процесса самовозгорания пылевых аэрозолей в условиях промышленных предприятий.

Ключевые слова: *электронная система, обоснование требований, пылеугольные аэрозоли, порог взрываемости, самовоспламенение, температура, промышленные предприятия.*

© Вовна О.В., Лактионов И.С., 2011