

Ю.А. Поляков

(Академия ГПС МЧС России; e-mail: info@academygps.ru)

О ПОВЫШЕНИИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ АВАРИЙНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ

Проведён анализ применения малоинерционного тонкоплёночного термосенсора с покрытием в качестве пожарного детектора в системах автоматической аварийной сигнализации тепловозных дизель-генераторов.

Ключевые слова: тепловозный дизель-генератор, термосенсор с покрытием.

Yu.A. Polyakov

ABOUT INCREASING THE OPERATING SPEED OF AUTOMATIC ALARM SYSTEMS OF LOCOMOTIVE DIESEL GENERATORS

The analysis of use fast-response thin-film termosensor with coating as detector in the systems of crash signaling of locomotive diesel generators was carried out.

Key words: locomotive diesel generators, termosensor with coating.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 30 ноября 2015 г.

Среди факторов, обеспечивающих безопасность железнодорожного транспорта, важную роль играет пожаровзрывобезопасность тепловозных дизель-генераторов.

Анализ существующих систем пожарной сигнализации показывает, что с целью повышения их надёжности и быстродействия необходимы качественно новые сигнализаторы аварийных ситуаций. Одним из главных источников аварий, взрывов и пожаров на тепловозах является дизель-генератор, поэтому для него необходима специальная автоматическая подсистема сверхраннего обнаружения и предупреждения о нарушении штатного режима его функционирования.

Наличие в картере дизель-генератора большого количества смазочного масла и масляных паров, прорывающихся из камеры сгорания, разогретых до высоких температур газов и поступающего через неплотности корпуса картера воздуха, в случае попадания в картер открытого пламени из камеры сгорания при прогарах и трещинах в поршне, создаёт реальную опасность возникновения взрыва или пожара.

Недостатком этих систем автоматической защиты является их большая инерционность, способность реагировать только на большие трещины, поэтому они не всегда успевают предотвратить возникновение пожара в картере. Наиболее эффективным способом раннего обнаружения возгорания в дизель-генераторе тепловоза можно считать получение практически "мгновенной" информации о повышении температуры или резкого изменения теплового состояния в объёме картера дизель-генератора в момент появления первой (даже малой) прогарной трещины.

Анализ явлений, развивающихся в картере дизель-генератора в период прорыва газов из камеры сгорания, вследствие скоротечного протекания процесса, даёт возможность использовать импульс температуры, образующийся при этом, в качестве первичного элемента информации, воздействующего на **чувствительный элемент (ЧЭ)**, выполненный в виде тонкоплёночного термосенсора, функционирующий в режиме ожидания.

Целесообразно применить тонкоплёночный термосенсор с быстродействием в несколько микросекунд в качестве первичного сигнализатора о начале аномального развития процесса в картере дизель-генератора.

Для исключения гальванического контакта с рабочим телом, а также с целью обеспечения механической прочности на чувствительную плёнку толщиной порядка десятой доли микрона наносится диэлектрическое покрытие из диоксида кремния толщиной 0,2-0,5 мкм.

Одним из основных условий эффективности работы системы **пожарной сигнализации (ПС)** является быстродействие первичного индикатора, в нашем случае – чувствительного элемента, покрытого тонкой изоляцией, которая, естественно, снижает динамические качества датчика.

В настоящей статье проведён анализ амплитудно-фазовых частотных характеристик тонкоплёночного термосенсора с тонкой изоляцией на основе метода передаточных функций.

Учитывая различие в теплофизических свойствах плёнки ЧЭ и диэлектрического покрытия, а также тот факт, что толщина покрытия значительно больше толщины ЧЭ, трёхслойную тепловую модель **термопреобразователя (ТП)** можно свести к двухслойной (рис. 1).

При этом ЧЭ будет фиксировать нестационарную температуру **контакта** покрытия (пластины) и подложки (полуограниченного стержня) [1]. Плёночный ТП будем рассматривать как преобразователь входной функции (тепловое воздействие) в выходную функцию (температура плёнки).

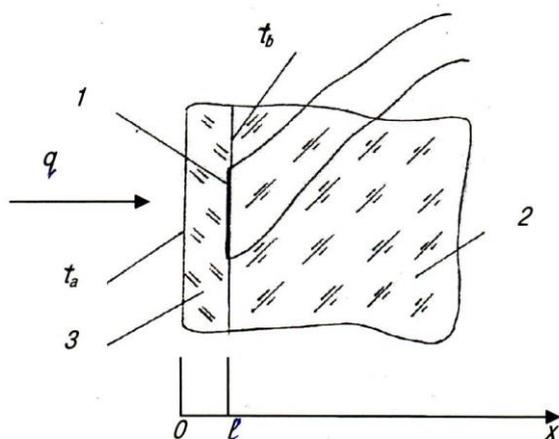


Рис. 1. Двухслойная тепловая модель термосенсора:
 1 – чувствительный элемент (плёнка); 2 – подложка; 3 – покрытие;
 q – удельный тепловой поток; l – толщина покрытия;
 t_a, t_b – температуры поверхности покрытия и ЧЭ

Для тепловой системы, состоящей из покрытия, плёнки и подложки, передаточная функция будет являться отношением преобразованной температуры контакта (плёнки) к внешнему преобразованному воздействию.

При анализе теплоёмкостью плёнки пренебрегаем. Полагаем независимость тепловых свойств материалов от температуры.

Пусть на систему при $\tau > 0$ действует тепловой поток $q(\tau)$.

Из решения уравнения нестационарной теплопроводности для покрытия и подложки преобразованная температура плёнки в контакте имеет вид:

$$T(\ell, s) = \left[\varepsilon_i \sqrt{s} \left(\operatorname{ch} \frac{\ell}{\sqrt{a_m}} \sqrt{s} + \frac{1}{Z} \operatorname{sh} \frac{\ell}{\sqrt{a_m}} \sqrt{s} \right) \right]^{-1} q(s), \quad (1)$$

где s – переменная Лапласа;

ε_i – коэффициент теплоусвоения материала подложки;

a_m – коэффициент температуропроводности покрытия;

$Z = \varepsilon_i / \varepsilon_m$ – отношение коэффициентов теплоусвоения материалов подложки и покрытия;

$q(s)$ – преобразованный по Лапласу тепловой поток $q(\tau)$.

Величина в квадратных скобках уравнения для температуры в контакте двух тел обозначается как Y_i . Это – передаточная функция, связывающая изображение температуры контакта с изображением теплового потока.

$$Y_i = T(\ell, s) / q(s).$$

Известно [2], что температура поверхности полупространства при отсутствии изоляции и пренебрежении тонкой чувствительной плёнкой может быть представлена (при $x = 0$) в виде:

$$T(0, s) = (\varepsilon_i \sqrt{s})^{-1} q(s), \quad (2)$$

где $(\varepsilon_i \sqrt{s})^{-1} = Y_0$ – передаточная функция, связывающая температуру поверхности с функцией теплового потока.

Исследуем функцию искажения, определяемую как

$$Y = \frac{Y_i}{Y_0} = \left(\operatorname{ch} \frac{\ell}{\sqrt{a_m}} \sqrt{s} + \frac{1}{Z} \operatorname{sh} \frac{\ell}{\sqrt{a_m}} \sqrt{s} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Разлагая гиперболические функции в ряд по малому параметру (ℓ) и пренебрегаем величинами второго порядка малости:

$$Y = \left(1 + \frac{\ell}{Z \sqrt{a_m}} \sqrt{s} + \frac{\ell^2}{2a_m} s \right)^{-1}. \quad (4)$$

Так как исследуемая система линейна, то заменим s на $i\omega$. Тогда

$$Y(i\omega) = (1 + b\sqrt{i\omega} + di\omega)^{-1}, \quad (5)$$

где $b = \ell / Z\sqrt{a_m} = \bar{c} / \varepsilon_i = \sqrt{\tau^*}$ (размерность времени);

$$d = \ell^2 / 2a_m = R\bar{c} / 2;$$

$R = \lambda / \ell$ – термическое сопротивление покрытия;

$\bar{c} = c\gamma l$ – теплоёмкость покрытия;

$$i = \sqrt{-1};$$

ω – циклическая частота.

После преобразований имеем:

$$Y(i\omega) = \frac{\left[1 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)b\sqrt{\omega}\right] - i\left[\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)b\sqrt{\omega} + d\omega\right]}{\left[1 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)b\sqrt{\omega}\right]^2 + \left[\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)b\sqrt{\omega} + d\omega\right]^2}$$

Частотные характеристики $Y(i\omega)$ определяются как

$$A(\omega) = \text{mod} Y(i\omega) = \left(\sqrt{1 + \sqrt{2}b\sqrt{\omega} + b^2\omega + \sqrt{2}bd\omega\sqrt{\omega} + d^2\omega^2}\right)^{-1},$$

$$\varphi(\omega) = \arg Y(i\omega) = \text{arctg} \left[- \left(\frac{1}{1 + \frac{\sqrt{2}}{2}b\sqrt{\omega}} + \frac{d\omega}{1 + \frac{\sqrt{2}}{2}b\sqrt{\omega}} \right) \right].$$

Введём обобщённую частоту, тогда $\Omega = \tau^*\omega$, где $\omega = 2\pi/T_\gamma$. В результате замены на величины Ω и ω получим для амплитуды и фазы следующие соотношения:

$$A(\Omega) = \left(1 + \sqrt{2}\Omega + \Omega + Z^2 \frac{\Omega}{2} \sqrt{2\Omega} + Z^4 \frac{\Omega^2}{2}\right)^{-1/2}, \quad (6)$$

где комплекс Z отражает соотношение коэффициентов теплоусвоения материалов подложки и покрытия.

С увеличением различий в этих параметрах динамические качества термосенсора ухудшаются.

$$\varphi(\Omega) = \text{arctg} \left[- \left(\frac{1}{1 + \sqrt{2/\Omega}} + \frac{Z^2\Omega}{2(1 + \sqrt{\Omega/2})} \right) \right]. \quad (7)$$

Анализ зависимостей (6) и (7) показывает, что в области $Z > 1$ имеет место существенное влияние покрытия на передаточную функцию ТП (рис. 2). Видно, что с увеличением Ω и Z амплитудные и фазовые искажения воспроизводимого ТП с покрытием импульса заметно увеличиваются, по сравнению с показаниями ТП без покрытия. Рабочей допустимой зоной является область, когда $A \leq 0,9$ и $\varphi \leq 5^\circ$, при этом предельная частота должна быть не ниже $\Omega = 10^{-3}$.

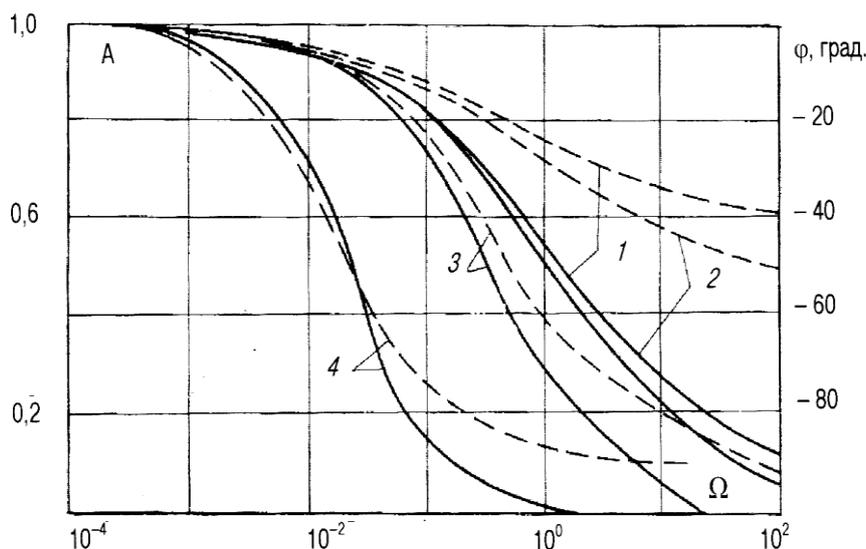


Рис. 2. Амплитудно-фазовые частотные характеристики Ω функции $Y(i\omega)$:
 1 – $Z = 0$; 2 – $Z = 0,5$; 3 – $Z = 2$; 4 – $Z = 10$
 ----- φ , ———— A

Для комплексного анализа запаздывания показаний плёночного термосенсора с покрытием амплитудно-фазовую частотную (АФЧ) характеристику можно представить в полярных координатах:

$$Y(i\omega) = A(\omega) \cdot e^{-i \arg Y(i\omega)} = P(\omega) + iQ(\omega),$$

годограф этого уравнения представлен на рис. 3.

Анализ показал, что наличие тонкой изоляции толщиной 0,2-0,5 мкм не ухудшает существенно динамические качества ТП. В диапазоне частот до 10 кГц и даже более ТП может служить оперативным сигнализатором аварийного и детонационного режимов в быстроходных двигателях.

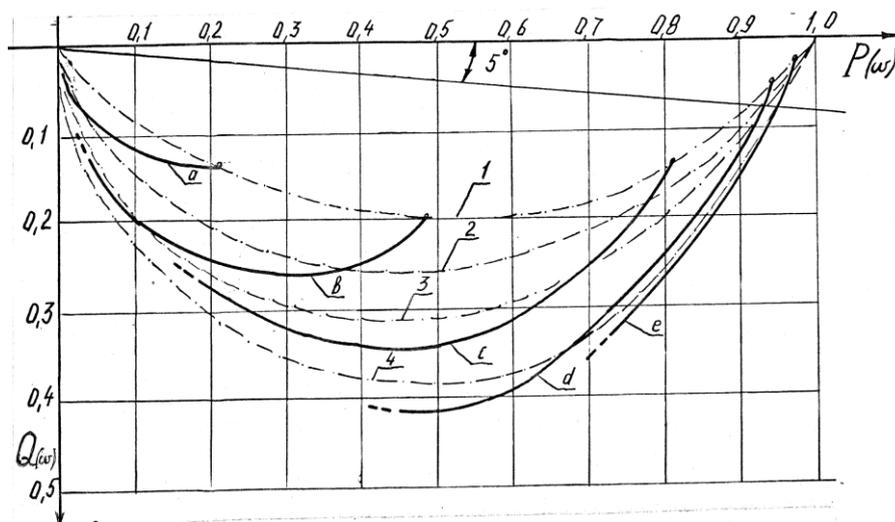


Рис. 3. Годограф АФЧ термосенсора с покрытием:

1 – $Z=0$; 2 – 0,5; 3 – 2; 4 – 10;
 $a - \Omega = 10$; $b = 1$; $c = 10$; $d = 10^{-2}$; $e = 10^{-3}$

Оценим время прогрева тонкого покрытия при действии теплового потока в виде ступенчатой функции, начиная с $\tau > 0$.

При малых толщинах покрытия, то есть при больших критериях Fo , разложение функции $i\epsilon r f c \beta$ в ряд по малому параметру $\frac{(2n+1)}{2\sqrt{Fo}}$ даёт возможность упростить соотношение для отношения температуры приёмной поверхности к температуре контакта покрытия и подложки (то есть к температуре плёнки) [3], в результате чего

$$\theta_t = \frac{t_i(\ell, \tau)}{t_m(0, \tau)} = \left[\frac{1 + Z^2 \sqrt{\pi}}{2Z\sqrt{Fo} - \sqrt{\pi}} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Преобразуем это соотношение относительно критерия Фурье

$$Fo = \frac{\pi}{4Z^2} \left(1 + \frac{Z^2 \theta_t}{1 - \theta_t} \right)^2. \quad (9)$$

Для обеспечения $\theta_t = 0,9$, используя (9), можно оценить тот нижний предел критерия Фурье, при котором это условие выполняется, а именно:

$$Fo_{\text{пред.}} = \frac{\pi}{4Z^2} (1 + 9Z^2)^2. \quad (10)$$

На рис. 4 представлена функция θ_t для различных Z .

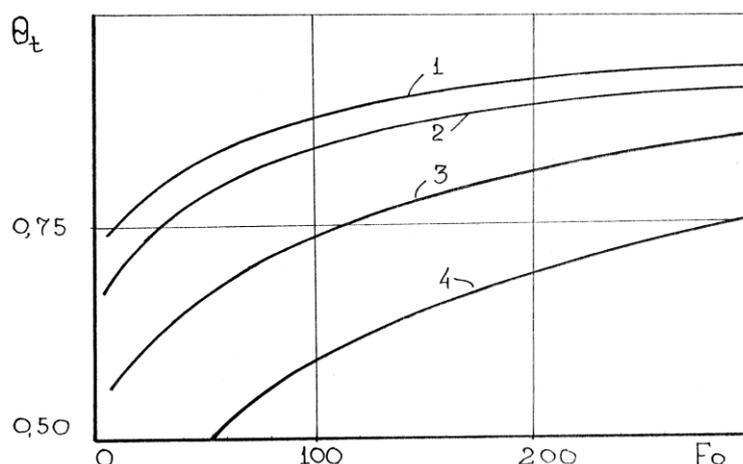


Рис. 4. Теоретическая зависимость функции θ_t от Fo :
 1 – $Z = 1,5$; 2 – $2,0$; 3 – $4,0$; 4 – $8,0$

Из рис. 4 можно оценить предельное значение Fo , обеспечение которого позволит добиться очень малого времени прогрева покрытия, практически за "читанные" микросекунды.

В качестве примера рассмотрим изоляцию из диоксида кремния толщиной $0,3 \text{ мкм}$ в виде покрытия для термосенсора, имеющего стеклянную подложку. Измерения теплофизических свойств тонкого слоя покрытия импульсным методом показали, что $Z = \varepsilon_i / \varepsilon_m \approx 1,5$. Для обеспечения $\theta_t = 0,9$ необходима величина $Fo = 157$. При этом время прогрева $\tau_{пр.} = 6 \text{ мкс}$.

На основании теоретических выкладок была создана конструкция термопреобразователя, представленная на рис. 5.



Рис. 5. Конструкция плёночного термосенсора в корпусе

Целью проведения экспериментальных исследований была оценка возможности применения разработанных тонкоплёночных термосенсоров с тонким диэлектрическим покрытием в качестве быстро реагирующих первичных сигнализаторов прорыва газов в картер двигателя.

Для проведения исследований использовались двухсекционные магистральные локомотивы с электрической передачей 2ТЭ10В с дизель-генератором марки 10Д100, оборудованные аварийной системой остановки дизеля при повышении давления масляных паров в картере.

Была разработана методика эксперимента с моделированием аварийной ситуации в картере и временной записью всех основных параметров с целью ранней диагностики аномального развития процесса в период нарушения штатного режима функционирования энергоагрегата.

В опытах использован поршень с пятью миллиметровыми отверстиями для осуществления процесса прорыва газов из камеры сгорания; таким образом имитировались прогар поршня или появление в нём трещины. Поршень устанавливался во втором цилиндре дизель-генератора со стороны нижнего коленчатого вала.

На время запуска дизеля и прогрева двигателя в течение 30 минут (для обеспечения необходимых для нормальной работы температуры и разрежения в картере) топливные насосы второго цилиндра отключались с помощью механизма управления электропневматическими вентилями топливных насосов. Тонкоплёночный термосенсор устанавливался в корпус картера.

Аварийная ситуация создавалась включением топливных насосов второго цилиндра и прорывом газов из камеры сгорания в картер дизеля.

Регистрация термограмм осуществлялась осциллографом Н-700 с помощью мостовой схемы. Специальное устройство наносило отметки на осциллограмме, соответствующие верхней мёртвой точке второго цилиндра, то есть моменту воспламенения топливной смеси. Термограмма на рис. 6 иллюстрирует картину аварийного процесса прорыва газов в картер дизеля.

При этом температура ЧЭ очень быстро (за ~ 10 мкс) возрастает на несколько десятков градусов, образуя импульс напряжения, по которому можно судить о прохождении мимо термосенсора фронта горячих газов.

Следующий оборот коленчатого вала вызывает повторный импульс быстрого действия сигнализатора.

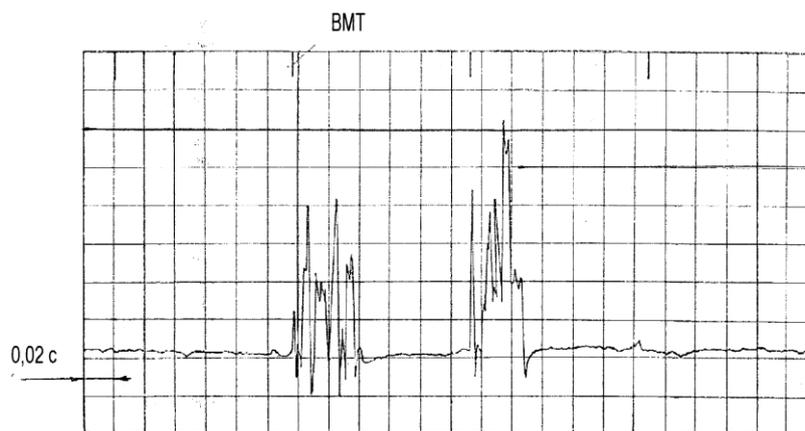


Рис. 6. Типичная термограмма регистрации процесса прорыва газов в картер (ВМТ – отметка верхней мёртвой точки)

Спектральная структура сигнала подтверждает высокие динамические качества плёночного термосенсора. Опыты провёл С.А. Дегтярёв.

Многочисленные опыты показали мгновенную реакцию ТП и их безотказную работу во время регистрации аварийных процессов.

При выполнении сравнительных измерений времени срабатывания тонкоплёночных термосенсоров и дифференциального манометра было выявлено, что инерционность последнего составляет 5-6 секунд, не считая инерционности реле управления РУ7.

Работа дизеля с трещиной в поршне в течение этого времени может привести к воспламенению (и приводила не раз) взрывоопасной смеси паров масла и газов с воздухом, взрыву или пожару в картере.

Предложена схема безинерционного аварийного автоматического отключения топливных насосов и остановки дизель-генератора (рис. 7).

Схема была протестирована с помощью электрического импульса, подаваемого на вход электродвигателя 6, который обеспечивает номинальный режим работы топливных насосов.

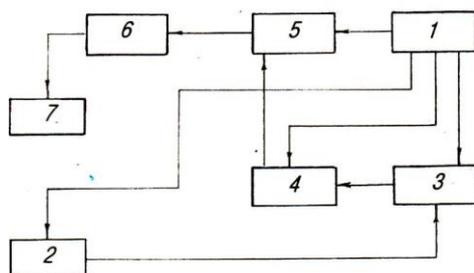


Рис. 7. Принципиальная схема автоматической пожарной защиты дизель-генератора с малоинерционным термосенсором:

- 1 – источник питания; 2 – тонкоплёночный термосенсор; 3 – импульсный усилитель; 4 – усилитель-формирователь; 5 – электронный блок остановки дизеля; 6 – электродвигатель топливных насосов; 7 – топливные насосы

Информацией о нарушении штатного режима работы дизельного двигателя является импульс температуры газов, прорывающихся в картер при прогарах или появления трещин в поршнях.

На основе малоинерционного сигнализатора была модифицирована система автоматического отключения топливного насоса при прорыве газов в картер дизель-генератора, что резко повысило его взрывобезопасность.

Предложенный метод расчёта пространственно-временных параметров тонкоплёночных термосенсоров даёт реальную возможность конструкторам этих микроэлектронных приборов разработать техническое обеспечение систем пожаровзрывозащиты объектов подвижного транспорта.

Можно сделать вывод, что тонкоплёночные термосенсоры, обладающие высоким быстродействием и достаточной чувствительностью, способны надёжно идентифицировать факт возникновения пожаровзрывоопасной ситуации в дизель-генераторах транспортного назначения [4].

Литература

1. Поляков Ю.А., Клыгин А.В., Дегтярёв С.А. Анализ температурных характеристик плёночных термопреобразователей тепловых потоков // Теплофизика высоких температур. 1982. № 6. С. 1169-1175.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1966. 599 с.
3. Поляков Ю.А., Дроздов С.А. К вопросу исследования плёночного термоприёмника с изоляцией в кратковременных процессах // Теплофизика высоких температур. 1969. № 1. С. 127-132.
4. Поляков Ю.А., Сазонов Ю.И. Скоростная индикация детонационных явлений в двигателях внутреннего сгорания // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2011. № 4. С. 11-15.
5. Поляков Ю.А. Анализ быстродействия плёночного термосенсора пожарного назначения // Технологии техносферной безопасности. Вып. 1 (65). 2016. 9 с. <http://ipb.mos.ru/ttb>.