
ПОЖАРНАЯ ТАКТИКА, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ

О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ФАКЕЛЬНОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЕНИЯ

**А.Ю. Андриюшкин, кандидат технических наук, доцент.
Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.**

А.А. Цой.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Проведен анализ существующих отечественных и зарубежных методик по определению эффективности огнезащитных покрытий для металлических конструкций. Разработана экспериментальная установка для испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературных газовых потоках. Показана возможность реализации типовых режимов испытаний (стандартный, углеводородный, наружный и др.) огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке с учетом влияния скорости потока. Предложена методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения.

Ключевые слова: огнезащитное покрытие, огнезащитная эффективность, температурный режим, газовый поток, методика

THE METHODS OF DEFINITION OF FIRE RATING OF FLAME-RETARDANT COATING FOR STEEL STRUCTURES IN HYDROCARBON JET FIRE

A.Yu. Andryushkin. Baltic state technical university «VOENMEH» named after D.F. Ustinov.

A.A. Tsoy. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The analysis of domestic and foreign methods by determine of fire rating of coating for metal structures. An experimental setup was developed for testing fire-resistant coatings in high temperature gas flows. The possibility of realization of typical modes of tests of fire protective coatings in high-temperature gas flow (standard fire curve, hydrocarbon fire curve, external fire curve and other) taking into account the influence of the flow velocity. The technique of definition of efficiency of fire-retardant coatings for steel structures in hydrocarbon jet fire.

Keywords: fire-retardant coating, fire rating, temperature-time curves, gas flow, methods

Анализ методик по определению эффективности огнезащитных покрытий для металлических конструкций

В отечественных и зарубежных нормативных документах представлены различные методики проведения испытаний огнезащитных покрытий на огнезащитную эффективность,

существенно отличающиеся условиями проведения испытаний. В настоящее время отсутствует методика определения огнезащитной эффективности покрытий в условиях факельного углеводородного горения, учитывающая температуру и скорость воздействующего на покрытие газового потока. Поэтому разработка такой методики своевременна и актуальна.

В Российской Федерации стандарт [1] регламентирует метод определения огнезащитной эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций. Сущность метода заключается в определении времени от начала теплового воздействия на опытный образец до наступления предельного состояния этого образца. Для стальных конструкций предельным состоянием по огнестойкости является достижение металлом температуры 500 °С.

В качестве образцов, на которые наносится средство огнезащиты, используют стальные колонны двутаврового сечения. Высота образца 1700±10 мм. На стальную колонну устанавливают термоэлектрические преобразователи и наносят средство огнезащиты в соответствии с рекомендуемой технологией.

Подготовленный образец помещают в печь и проводят испытания в соответствии с ГОСТ 30247.0–94 [2]. В процессе испытания в печи должен быть создан стандартный температурный режим, характеризуемый зависимостью:

$$T=T_0+345\cdot\lg(8\cdot t+1), \quad (1)$$

где T – температура в печи, соответствующая времени t , °С; T_0 – температура в печи до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °С; t – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Кроме колонны двутаврового сечения могут быть испытаны другие образцы: швеллеры, уголки, листы и др.

Как указано в ГОСТ 30247.0–94 [2], при необходимости может быть создан другой температурный режим, учитывающий реальные условия пожара и отличающийся от стандартного режима. ГОСТ РЕН 1363-2–2014 устанавливает альтернативные и дополнительные методы испытания конструкций на огнестойкость, учитывающие реальные условия пожара. Предусмотрены три альтернативных температурных режима: углеводородный, наружный, медленно развивающийся (тлеющий) (рис. 1).

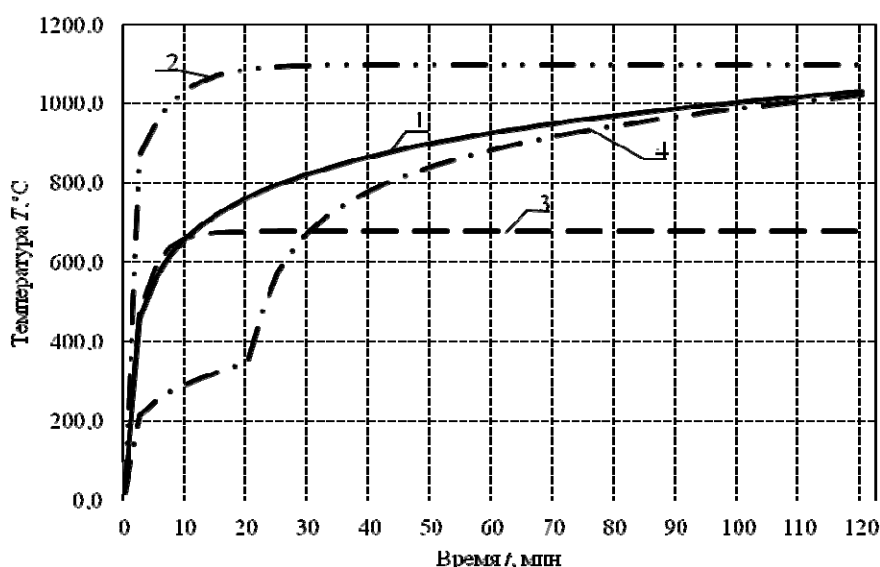


Рис. 1. Температурные режимы: 1 – стандартный; 2 – углеводородный; 3 – наружный; 4 – медленно развивающийся (тлеющий)

Как видно из графиков, все четыре типа режима отражают постепенный нагрев конструкции. Режим, создающий эффект «теплового удара пламени», отсутствует.

Все остальные существующие методики по своей сути аналогичны методике [1].

В методике [3] представляется метод определения теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу, сущность которого заключается в определении времени прогрева необогреваемой стороны образца до критической температуры (для стали -500 °С) в процессе испытаний, которые проводятся по температурному режиму, заданному в соответствии с таблицей.

Таблица. Температурный режим проведения испытаний по методике [3]

Время, t , мин	Температура, T , °С	Время, t , мин	Температура, T , °С
5	550–590	30	810–840
10	650–690	35	840–870
15	710–750	40	860–890
20	755–795	45	870–900
25	790–820	–	–

Примечание: t – время от начала испытания, мин; T – температура в печи, соответствующая времени t , °С

Данный температурный режим в численном виде отражает зависимость стандартного режима испытаний. Отличием данной методики является испытание образцов в виде пластинок из стали марки Ст3 с размерами $(140\pm 1)\times(80\pm 1)$ мм и толщиной 0,8–0,9 мм в испытательной установке, представляющей собой печь с трубчатыми электронагревательными приборами. Изменение температурного режима печи не представляется возможным. Особенностью данной методики является измерение теплового потока, падающего на образец.

В руководстве [4] изложены методы контроля качества огнезащитных работ, среди которых имеется несколько экспресс-методов. Метод оценки качества примененных огнезащитных составов по металлу сравнивает значения времени эффективности теплоизоляции, полученные при испытаниях образца по методике [3] и значения времени, полученные для этого образца при сертификационных испытаниях. То есть для прогноза определенной группы эффективности необходимо получение значений:

$$\tau_x \geq \tau_э,$$

где τ_x – значение времени огнезащитной эффективности испытуемого образца; $\tau_э$ – значение времени огнезащитной эффективности для эталонного образца огнезащитного покрытия.

В основе методов оценки качества огнезащитной обработки вспучивающимися огнезащитными составами и оценки качества примененных вспучивающихся огнезащитных составов лежит расчет коэффициента вспучивания по приложению Ф стандарта [5]. Для оценки качества отбираются образцы покрытия, из которых вырезаются диски диаметром 3–5 мм в количестве не менее трех штук и помещаются на негорючую термоустойчивую подложку на расстоянии не менее 10 мм друг от друга. Далее проводят определение коэффициента вспучивания. Вспучивание покрытия производят в термошкафу с выдержкой образца при температуре 600 °С в течение 5 мин.

Коэффициент вспучивания $K_{вс}$ рассчитывают как отношение толщины вспученного слоя h к исходной толщине покрытия h_0 :

$$K_{вс} = h/h_0.$$

Коэффициент вспучивания покрытия определяют как среднее арифметическое трех измерений для всех испытанных образцов, он должен составлять не менее 10 [6].

Можно сделать вывод о том, что на территории Российской Федерации существующие методы по определению эффективности средств огнезащиты не предусматривают проведение испытаний в условиях факельного углеводородного горения.

Некоторые подходы к решению данной проблемы изложены в зарубежных стандартах:

– ANSI/UL 1709 «Rapid Rise Fire Test of Protection Materials for Structural Steel» (стандарт США);

– BS 476, Parts 20-21: 1987 Appendix D – «Hydrocarbon Heating Conditions» (Британский стандарт);

– ISO 22899-1:2007 «Determination of the resistance to jet fires of passive fire protection materials - Part1: General requirements» (Международный стандарт);

– NFPA 58, Annex H- Procedure for Torch Fire and Hose Stream Testing of Thermal Insulating Systems for LP- Gas Containers (стандарт США).

Стандарт США UL 1709 – первый из стандартов, в котором был представлен режим углеводородного горения. Он определяет критерии стойкости огнезащитных покрытий в условиях пожара, при котором температура 1 100 °С достигается за первые 5 мин горения. Такая температура пожара (1 100 °С) поддерживается на протяжении всего периода испытания. Дополнительно, проводится испытание по стандарту «прямого удара» реактивного пламени (Jet Fire) (Lloyd's Register).

Международные стандарты ISO 22899-1:2007 и ISO/TR 22899-2:2013 описывают метод, в котором дается представление о поведении огнезащитных материалов и стальных конструкций под воздействием реактивного пламени. Реактивное пламя моделируется с помощью выброса горючих газов высокого давления, сжиженного газа и воспламеняющегося жидкого топлива, что увеличивает тепловые и механические нагрузки на огнезащитные материалы, увеличивает конвективный и радиационный тепловой поток, схожие с сильной эрозией. Для создания подобных условий данный метод предусматривает помещение образца в полукамеру с подведенной трубой, через которую происходит выброс газа, в результате чего образуется огненный шар. В качестве топлива используется пропан. Высокие эрозивные показатели образуются, благодаря высокоскоростной газовой струе, проходящей над образцом на расстоянии одного метра [7].

Основным недостатком данных стандартов является использование достаточно громоздкого и дорогостоящего оборудования, что обуславливает целесообразность разработки более экономичных и простых методов испытаний. К тому же представленные методики не гарантируют повторяемости условий проведения эксперимента, так как параметры высокоскоростной струи газа (скорость, температура) при взаимодействии с огнезащитным покрытием могут существенно изменяться и их трудно контролировать.

Часто имитация высокотемпературного газового потока при проведении испытаний осуществляется различными газовыми горелками, которые обеспечивают формирование газового потока с постоянными параметрами истечения: скорость и температура [8].

В целях разработки методики определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения было предложено применение экспериментальной установки с применением кислородно-ацетиленовой горелки. Температура пламени ацетилена сравнительно выше других горючих газов, используемых в газовых горелках, и может составлять 3 200 °С, что позволяет достичь необходимой температуры газового потока (1 100 °С) при проведении испытаний и избежать больших экономических затрат.

Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения

Установка для испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке представляет собой вертикальный теплоизолированный ограждающий корпус, внутри которого установлен теплоизолированный подвижный держатель образца, который может перемещаться вдоль оси корпуса с помощью резьбового штока (рис. 2). Резьбовой шток приводится во вращение устройством механической подачи, обеспечивающим заданный режим перемещения теплоизолированного держателя образца в высокотемпературном газовом потоке. Сверху на корпусе установлена кислородно-ацетиленовая горелка, мундштук которой выставлен соосно оси корпуса. Таким образом, ось мундштука совпадает с осью испытуемого образца, что обеспечивает симметричное воздействие газового потока на огнезащитное покрытие.

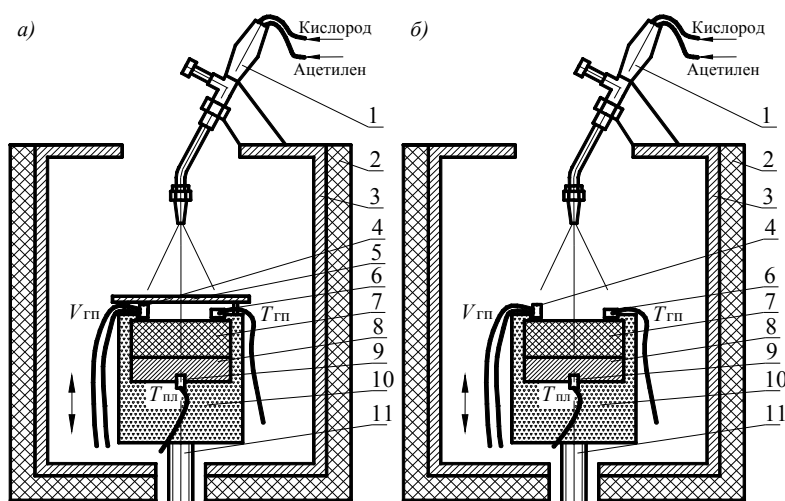


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке: а – испытания при типовых температурных режимах; б – испытания в высокотемпературном газовом потоке (1 – кислородно-ацетиленовая горелка; 2 – теплоизоляция; 3 – ограждающий корпус; 4 – приемник давления газового потока (трубка Пито); 5 – защитный экран; 6 – термоэлектрический преобразователь измерения температуры газового потока; 7 – огнезащитное покрытие; 8 – стальная пластина; 9 – термоэлектрический преобразователь измерения температуры стальной пластины; 10 – теплоизолированный подвижный держатель образца; 11 – шток перемещения держателя с образцом)

Размеры ограждающего корпуса должны быть согласованы с размерами газового потока, создаваемого горелкой. При этом диаметр ограждающего корпуса должен быть больше диаметра газового потока на участке перемещения теплоизолированного подвижного держателя образца. Температура пламени кислородно-ацетиленовой горелки может достигать 3 200 °С, скорость истечения газового потока – 200 м/с. По мере удаления от мундштука кислородно-ацетиленовой горелки температура и скорость газового потока постепенно уменьшаются. Размещая испытуемый образец на заранее определенных расстояниях от газовой горелки, можно задавать необходимый температурный режим воздействия газового потока. При этом скорость газового потока также будет варьироваться в зависимости от расстояния до газовой горелки. Параметры высокоскоростного газового потока контролируют термопарой и приемником давления газового потока (трубка Пито), установленными перед огнезащитным покрытием. Термопара измеряет температуру газового потока $T_{гп}$ (°С), а приемник давления газового потока – скорость газового потока $V_{гп}$ (м/с) по разнице полного и статического давлений потока. Таким образом, перемещая испытуемый образец в высокотемпературном газовом потоке, имитируют реальные условия интенсивного пожара, характерного для объектов нефтегазовой отрасли.

Предложенная методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций предполагает комплексное тепловое и аэродинамическое воздействие на испытуемый образец. При этом температура газового потока является основным фактором разрушения покрытия, а скорость – вспомогательным. Испытания огнезащитных покрытий проводят при различных температурных режимах, в том числе имитирующих условия факельного углеводородного горения. Для уменьшения разброса данных следует придерживаться постоянства условий эксперимента, что требует тщательной настройки оборудования, поддержания необходимых параметров газового потока (скорость, температура).

Для проведения испытаний при типовых температурных режимах (стандартный, углеводородный; наружный; медленно развивающийся (тлеющий) по ГОСТ 30247.0–94 и ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014 перед образцом на кронштейнах теплоизолированного подвижного держателя устанавливается защитный экран (рис. 2 а). При этом аэродинамическое воздействие потока воспринимает защитный экран, а не огнезащитное покрытие, нанесенное на стальную пластину. Приемник давления газового потока (трубка Пито) и термопара измерения температуры газового потока находятся между защитным экраном и испытуемым образцом, регистрируя параметры среды, воздействующей на огнезащитное покрытие. В этом случае скорость газового потока $V_{гр} \approx 0$, а температура $T_{гр}$ изменяется по выбранному типовому температурному режиму. Проведение испытаний огнезащитных покрытий с учетом скорости газового потока проводится без защитного экрана (рис. 2 б).

Образец представляет собой круглую или восьмигранную стальную пластину толщиной 5 мм с нанесенным на нее огнезащитным покрытием (рис. 3). Огнезащитное покрытие необходимой толщины $h_{оп}$ наносится по технологии, рекомендуемой производителем. С незащищенной стороны стальной пластины на ее оси установлена термопара измерения температуры стальной пластины. Теплоизолирующий подвижный держатель охватывает испытуемый образец, изолируя его от контакта с высокотемпературным газовым потоком с незащищенной покрытием стороны, а также с боковой поверхности покрытия и стальной пластины. Таким образом, высокоскоростной тепловой поток воздействует на расположенное к нему перпендикулярно огнезащитное покрытие, постепенно нагревая его и стальную пластину. Температура $T_{пл}$ (°C) стальной пластины регистрируется термопарой, зачеканенной на оси стальной пластины с незащищенной покрытием стороны.

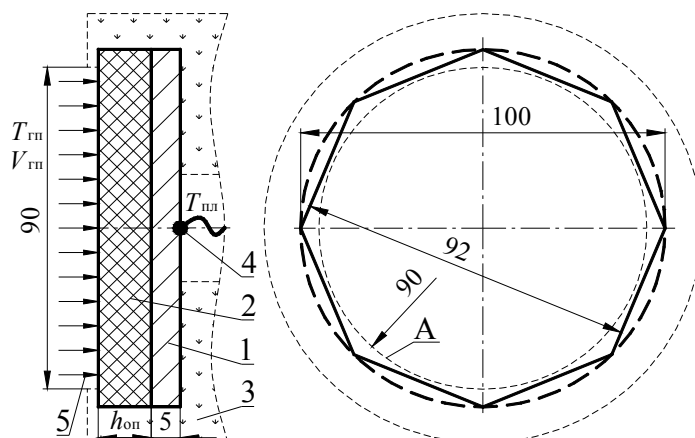


Рис. 3. Образец для испытаний (1 – стальная пластина; 2 – огнезащитное покрытие; 3 – теплоизолированный подвижный держатель образца; 4 – термопара измерения температуры стальной пластины; 5 – высокотемпературный газовый поток; А – периметр площади огнезащитного покрытия, подвергнутой воздействию высокотемпературного газового потока; $h_{оп}$ – толщина огнезащитного покрытия)

Одним из основных этапов предлагаемой методики является определение параметров созданного кислородно-ацетиленовой горелкой высокотемпературного газового потока вдоль его оси. Определение параметров газового потока проводят экспериментально, с учетом применения конкретной газовой горелки, в следующей последовательности [6].

Теплоизолированный подвижный держатель образца с постоянной скоростью движется вдоль оси газового потока, постепенно приближаясь к газовой горелке, то есть варьируется расстояние от газовой горелки до огнезащитного покрытия $l_{гп}$. Через каждые 10 мм термопара регистрирует температуру газового потока $T_{гп}$, а приемник давления газового потока – его скорость $V_{гп}$ (рис. 4). В результате получают зависимости температуры $T_{гп}$ и скорости $V_{гп}$ газового потока от расстояния между газовой горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$ (рис. 5, 6).

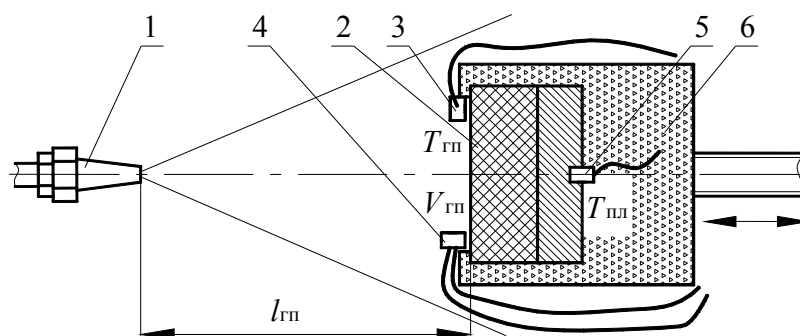


Рис. 4. Схема определения параметров высокотемпературного газового потока (1 – кислородно-ацетиленовая горелка; 2 – огнезащитное покрытие; 3 – термопара измерения температуры газового потока; 4 – приемник давления газового потока (трубка Пито); 5 – термопара измерения температуры стальной пластины; 6 – теплоизолированный подвижный держатель образца)

При настройке экспериментальной установки с кислородно-ацетиленовой горелкой определяют начальные параметры газового потока (температура и скорость) затем устанавливают распределение этих параметров вдоль оси газового потока. Температура и скорость газового потока уменьшаются с увеличением расстояния от газовой горелки $l_{гп}$ (рис. 4). Для описания зависимости температуры и скорости от расстояния от газовой горелки удобны степенные и экспоненциальные уравнения регрессии:

$$T_{гп} = a_{рег} \cdot T_{0гп} \cdot \exp(b_{рег} \cdot (l_{гп}/d)) , \quad (1)$$

где $T_{гп}$ – температура газового потока, °С; $l_{гп}$ – расстояние от газовой горелки до огнезащитного покрытия, м; d – диаметр отверстия истечения в газовой горелке, м; $T_{0гп}$ – температура пламени газовой горелки, °С; $a_{рег}$, $b_{рег}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

$$V_{гп} = a_{рег} V_{0гп} \cdot (l_{гп}/d)^{b_{рег}} , \quad (2)$$

где $V_{гп}$ – температура газового потока, м/с; $V_{0гп}$ – скорость истечения газов из сопла газовой горелки, м/с.

Для кислородно-ацетиленовой горелки, примененной в экспериментальной установке, на основе экспериментальных данных определим коэффициенты уравнений регрессии ($a_{рег}$; $b_{рег}$) с помощью метода наименьших квадратов. При испытаниях использовалась кислородно-ацетиленовая горелка со следующими параметрами:

- диаметр отверстия истечения в газовой горелке $d=3$ мм;
- температура пламени газовой горелки $T_{0гп}=2\ 900$ °С;

– скорость истечения газов из сопла газовой горелки $V_{0гп}=170$ м/с.

Зависимость температуры газового потока $T_{гп}$ от расстояния между газовой горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$ описывается выражением (1) со следующими коэффициентами:

$$T_{гп}=1,055 \cdot T_{0гп} \cdot \exp(-0,020 \cdot (l_{гп}/d)) . \quad (3)$$

Зависимость скорости газового потока $V_{гп}$ от расстояния между газовой горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$ описывается выражением (2) со следующими коэффициентами:

$$V_{гп}=2,618 \cdot V_{0гп} \cdot (l_{гп}/d)^{-0,760} . \quad (4)$$

По приведенным зависимостям (3) и (4) получают распределение температуры и скорости газового потока вдоль его оси и разрабатывают программу перемещения теплоизолированного подвижного держателя образца в высокотемпературном газовом потоке.

Разработанная методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций позволяет проводить комплексное испытание огнезащитных покрытий в высокотемпературных газовых потоках, в том числе, имитировать условия факельного углеводородного горения. Предложенная методика, учитывающая температуру и скорость газового потока, дополняет существующие методы испытаний огнезащитных покрытий. Данная методика может быть рекомендована к применению в исследовательских пожарных лабораториях, экспертных организациях, научно-исследовательских и учебных организациях пожарно-технического профиля.

Литература

1. ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Методы определения огнезащитной эффективности. М.: Стандартинформ, 2009. 14 с.
2. ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2003. 10 с.
3. Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу: методика. М.: ВНИИПО, 1998. 19 с.
4. Оценка качества огнезащиты и установление вида огнезащитных покрытий на объектах: руководство. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2010. 14 с.
5. ГОСТ Р 12.3.3047–98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 88 с.
6. Андрушкин А.Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением: монография. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2012. 400 с.
7. ГОСТ Р 12.3.047–2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».
8. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г., Гусовский В.Л. Горелочные устройства промышленных печей и топок (конструкции и технические характеристики): справочник. М.: «Интернет Инжиниринг», 1999. 560 с.

References

1. GOST R 53295–2009. Sredstva ognezashhity dlja stal'nyh konstrukcij. Obshhie trebovanija. Metody opredelenija ognezashhitnoj jeffektivnosti. M.: Standartinform, 2009. 14 s.
2. GOST 30247.0–94. Konstrukcii stroitel'nye. Metody ispytanij na ognestojkost'. Obshhie trebovanija. M.: Standartinform, 2003. 10 s.

3. Opredelenie teploizolirujushhijh svojstv ogneszashhitnyh pokrytij po metallu: metodika. M.: VNIPO, 1998. 19 s.
4. Ocenka kachestva ogneszashhity i ustanovlenie vida ogneszashhitnyh pokrytij na obektah: rukovodstvo. M.: FGU VNIPO MChS Rossii, 2010. 14 s.
5. GOST R 12.3.3047–98. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaja bezopasnost' tehnologicheskijh processov. Obshhie trebovanija. Metody kontrolja. M.: IPK Izd-vo standartov, 1998. 88 s.
6. Andrjushkin A.Ju. Formirovanie dispersnyh sistem sverhsvukovym gazodinamicheskim raspyleniem: monografija. SPb.: BGTU «VOENMEH», 2012. 400 s.
7. GOST R 12.3.047–2012. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaja bezopasnost' tehnologicheskijh processov. Obshhie trebovanija. Metody kontrolja. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Garant».
8. Vintovkin A.A., Ladygichev M.G., Gusovskij V.L. Gorelochnye ustrojstva promyshlennyh pechej i topok (konstrukcii i tehniczeskie harakteristiki): spravochnik. M.: «Internet Inzhiniring», 1999. 560 s.