

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОЛЩИН ОГНЕЗАЩИТНЫХ ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ РЕАЛЬНОГО ПОЖАРА²

Пузач С.В.*, д.т.н., профессор, Полевода И.И., к.т.н., доцент, Иваницкий А.Г.
*Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

Приведена математическая модель расчета прогрева металлических строительных конструкций с нанесенным слоем огнезащитного вспучивающегося покрытия с учетом термогазодинамики реального пожара. Проведено тестирование модели по экспериментальным данным сертификационных испытаний огнезащитных вспучивающихся покрытий «Терма», «Nullifire», «Renitherm PMS-R», «Совер» и «Interchar 963». Представлены и обсуждены результаты оптимизации толщин сухого слоя краски «Renitherm PMS-R», наносимой на стальные строительные конструкции многофункционального центра, на основе численного эксперимента по предложенному методу расчета.

(Поступила в редакцию 6 июня 2008 г.)

Введение. При анализе пожарной опасности в соответствии с нормативными документами [1] могут использоваться расчетные сценарии, основанные на соотношении временных параметров развития и распространения опасных факторов пожара и позволяющие определить риск для людей и конструкций здания и выбрать наиболее эффективные варианты противопожарной защиты.

При определении огнестойкости строительных конструкций вопрос точности и надежности метода расчета тепломассообмена при пожаре является ключевым. Сложность разработки такого метода заключается в многофакторности и нелинейности задачи [2].

В действующих нормах пожарной безопасности фактические пределы огнестойкости устанавливаются на основе определения эквивалентной продолжительности пожаров и коэффициента огнестойкости [3] или по экспериментальным данным по поведению конкретной конструкции в условиях «стандартного» пожара [4]. Однако такой подход не учитывает реальные условия пожара на конкретном объекте, такие как, например, реальный термогазодинамический режим пожара, теплофизические и химические свойства находящейся в помещении горючей нагрузки, геометрические размеры помещения, размеры и расположение проемов и т. д.

В условиях реального пожара прогрев строительных конструкций может существенно отличаться от нагрева в режиме «стандартного» пожара [2]. Поэтому толщины сухого слоя огнезащитных покрытий при реальном пожаре для обеспечения той же величины огнезащитной эффективности могут не совпадать с соответствующими значениями, приведенными в сертификатах пожарной безопасности. Это позволяет проводить оптимизацию вышеуказанных толщин для конкретного объекта со своей индивидуальной геометрией и пожарной нагрузкой с целью минимизации затрат на огнезащиту.

Математическая модель расчета огнестойкости металлических строительных конструкций. Для определения температур внутри стенки металлических конструкций с нанесенным огнезащитным вспучивающимся покрытием решается уравнение теплопроводности [9]:

² Материал статьи был доложен на Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций», Минск, 2–3 октября 2008 г.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность материала конструкции;

c – удельная теплоемкость материала конструкции;

T – температура;

λ – коэффициент теплопроводности материала конструкции;

y – координата, направленная по толщине материала;

τ – время.

Уравнение (1) решается численным методом контрольных объемов [10].

Граничные условия к уравнению (1) имеют вид:

– наружная (нагреваемая) поверхность огнезащитного покрытия:

граничные условия 3-го рода:

а) «стандартный» пожар [11]:

температура газовой среды (T_m) в горящем помещении изменяется в соответствии с кривой «стандартного» пожара [11]:

$$T_m = 345 \cdot \lg(0,133 \cdot \tau + 1) + T_0; \quad (2)$$

коэффициент теплоотдачи (α) от газовой среды к поверхности конструкции равен [11]:

$$\alpha = 29 + 5,75 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \frac{(T_m/100)^4 - (T_b/100)^4}{T_m - T_b}; \quad (3)$$

б) реальный пожар [2]:

для стен и колонн:

$$q_{w1} = \alpha_w^* \cdot (T_m - T_{w1}); \quad \alpha_w^* = 15,9 \cdot \psi_{r1}^{0,222}; \quad (4)$$

для перекрытия:

$$q_{c1} = \alpha_c^* \cdot (T_m - T_{c1}); \quad \alpha_c^* = \frac{17,2 \cdot \psi_{r1}^{0,222}}{1 - 0,127 \cdot \psi_{r1}^5 \cdot \exp(-1,6 \cdot \psi_{r1})}, \quad (5)$$

где q_{w1} и q_{c1} – локальные удельные тепловые потоки в стены и перекрытие;

T_{w1} и T_{c1} – локальные температуры внутренних поверхностей стен (колонн) и балок перекрытий;

α_w^* и α_c^* – приведенные коэффициенты теплоотдачи стен (колонн) и перекрытия;

$$\psi_{r1} = M_0 / F_w;$$

M_0 – начальная масса пожарной нагрузки;

F_w – суммарная площадь внутренней поверхности стен и перекрытия;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты газовой среды помещения и облучаемой поверхности;

T_0 – начальная температура;

T_b – температура наружной (нагреваемой) поверхности огнезащитного покрытия.

Граничное и дополнительное условия, соответственно:

– на внутренней поверхности стальной конструкции колонны коэффициент теплоотдачи $\alpha=0$ Вт/(м² К) (адиабатная стенка);

– y – ось симметрии стальной конструкции перекрытия, и, следовательно, $\partial T/\partial y = 0$;

Температура на поверхности слоя огнезащитной краски из-за низкой величины коэффициента теплопроводности быстро достигает значения, при котором заканчивается вспучивание огнезащитного покрытия и его стабилизация. Вышеуказанное критическое значение температуры составляет, например, 177 °С [5, 6] для состава «Терма» и 230 °С [7, 8] в случае краски «Renitherm PMS-R». Поэтому при расчете нагрева стенки стальной конструкции с нанесенным огнезащитным вспучивающимся покрытием принимаем, что огнезащитное покрытие имеет толщину, равную ее величине во вспученном состоянии.

Принятое допущение об отсутствии теплоотвода от внутренней поверхности стальной конструкции колонны является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева конструкции.

В настоящей статье предполагается идеальный тепловой контакт между слоями вспученного покрытия и стальной конструкции, что также является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева конструкции.

Потеря несущей способности строительной конструкции определяется по достижению локальной температурой ее критического значения [2, 11].

Для расчета термогазодинамики пожара в помещении, необходимой для определения граничных условий к уравнению (1), используются модифицированные интегральный [2] и зонный [12] методы расчета.

Тестирование математической модели. Тестирование модели проводилось на основе данных по сертификационным испытаниям в условиях «стандартного» пожара огнезащитных вспучивающихся красок «Терма» [6], «Nullifire S607-HB» [13], «Renitherm PMS-R» [7, 8] и «Interchar 963» [15], а также огнезащитного покрытия «Совер» [16].

Физические свойства стальных конструкций помещений определялись по [14]:

- плотность $\rho = 7800$ кг/м³;
- удельная теплоемкость $c = 470 + 0,21 \cdot t + 5,0 \cdot 10^{-4} \cdot t^2$ Дж/(кг·град);
- коэффициент теплопроводности $\lambda = 58 - 0,042 \cdot t$ Вт/(м·град),

где t – температура в градусах Цельсия.

Теплофизические свойства вспученного покрытия определялись из сопоставления результатов расчета по предложенной методике (рисунки 1–4) с сертификационными испытаниями огнезащитных красок.

Полученные значения теплофизических свойств вспученных покрытий практически совпадают с экспериментально измеренными величинами, например:

– краска «Терма» [5]: плотность $\rho=0,8$ кг/м³; эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}=0,05-0,32$ Вт/(м·К);

– краска «Interchar 963»: $\rho=0,8$ кг/м³; $\lambda_{эф}=0,2-0,4$ Вт/(м·К);

– огнезащитное покрытие «Совер»: $\rho=250$ кг/м³; $\lambda_{эф}=0,06-0,12$ Вт/(м·К).

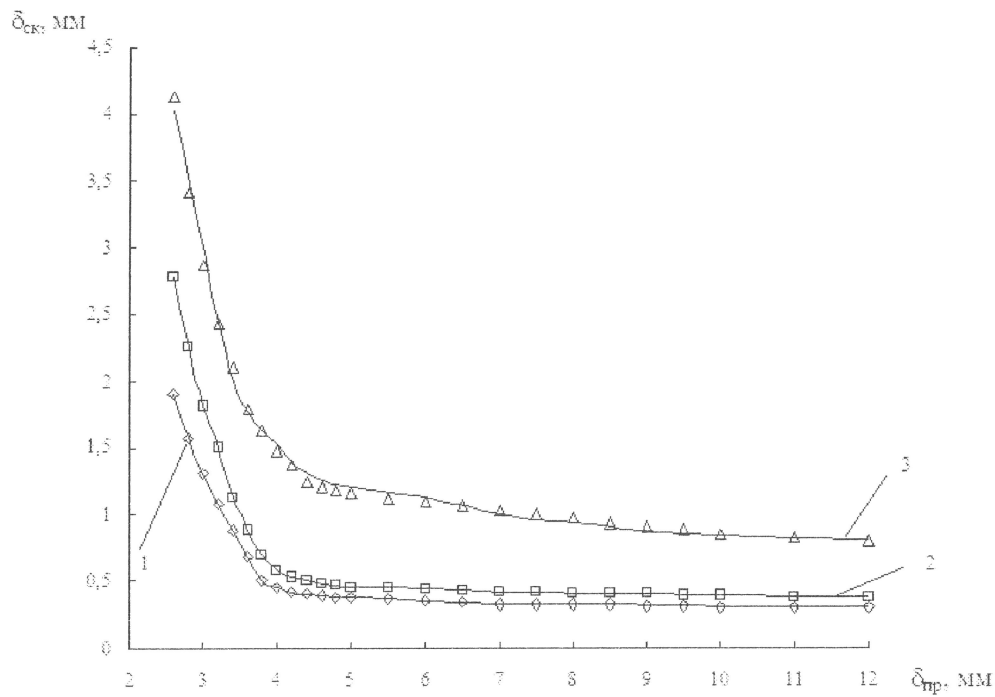
Для определения теплофизических свойств огнезащитной вспучивающейся краски «Renitherm PMS-R» при применении предложенной математической модели использовались следующие исходные данные [7, 8]:

– коэффициент вспучивания $k_b=40$;

– фактический предел огнестойкости R45: толщина сухого слоя $\delta_{ск}=1,0$ мм; приведенная толщина стальной конструкции $\delta_{пр}=3,4$ мм;

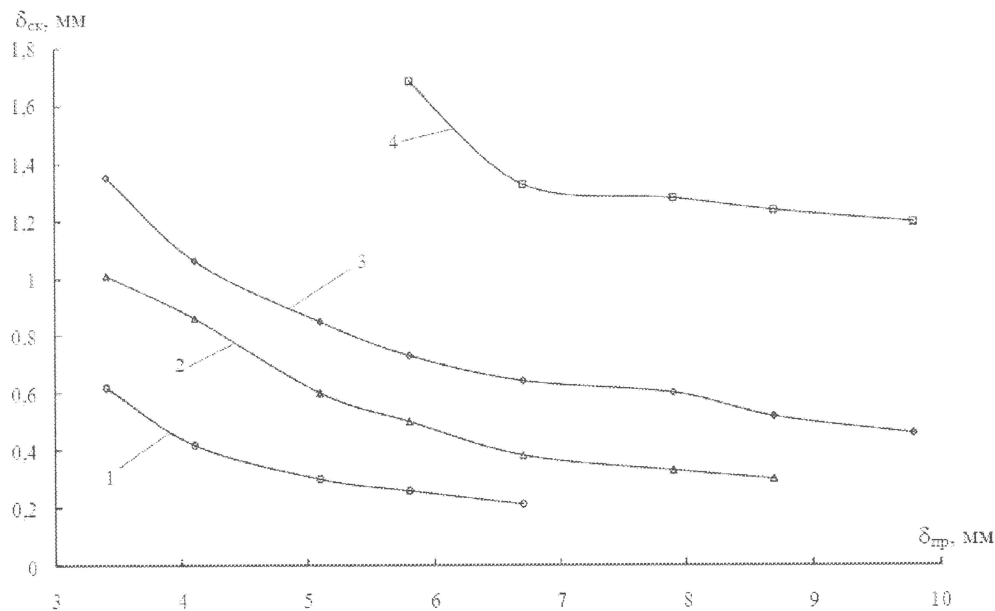
– R60: $\delta_{ск}=1,2$ мм; $\delta_{пр}=4,2$ мм;

– R90: $\delta_{ск}=1,7$ мм; $\delta_{пр}=5,8$ мм.



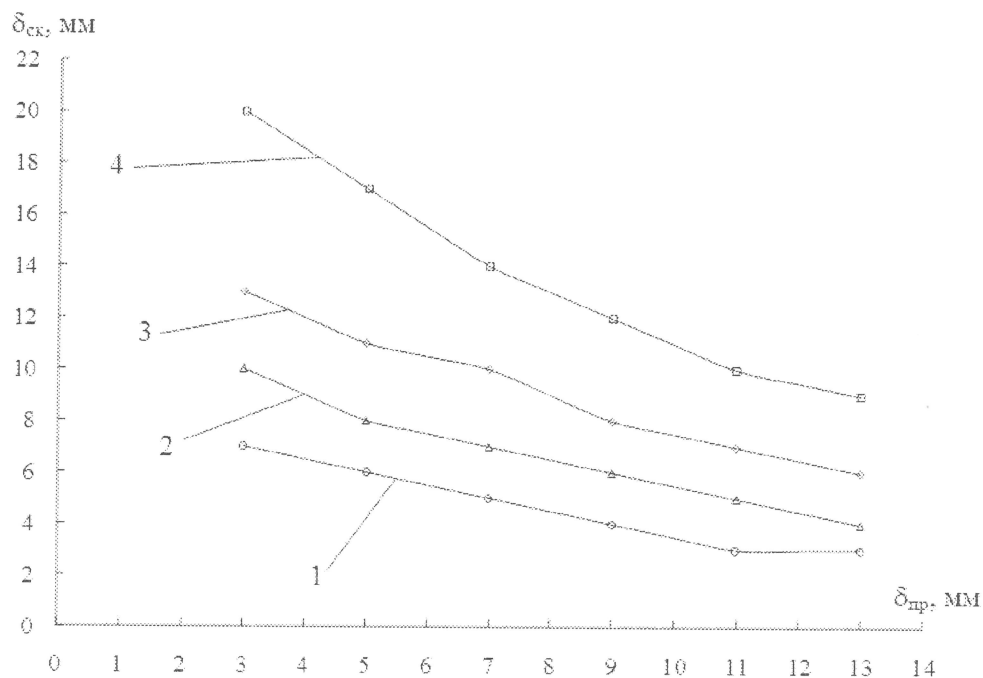
R30: 1 – расчет, \diamond – эксперимент; R45: 2 – расчет, \square – эксперимент; R60: 3 – расчет, Δ – эксперимент

Рисунок 1 – Зависимости толщины сухого слоя краски «Терма» ($\delta_{\text{сух}}$) от приведенной толщины стальных профилей ($\delta_{\text{пр}}$) при различных величинах фактических пределов огнестойкости



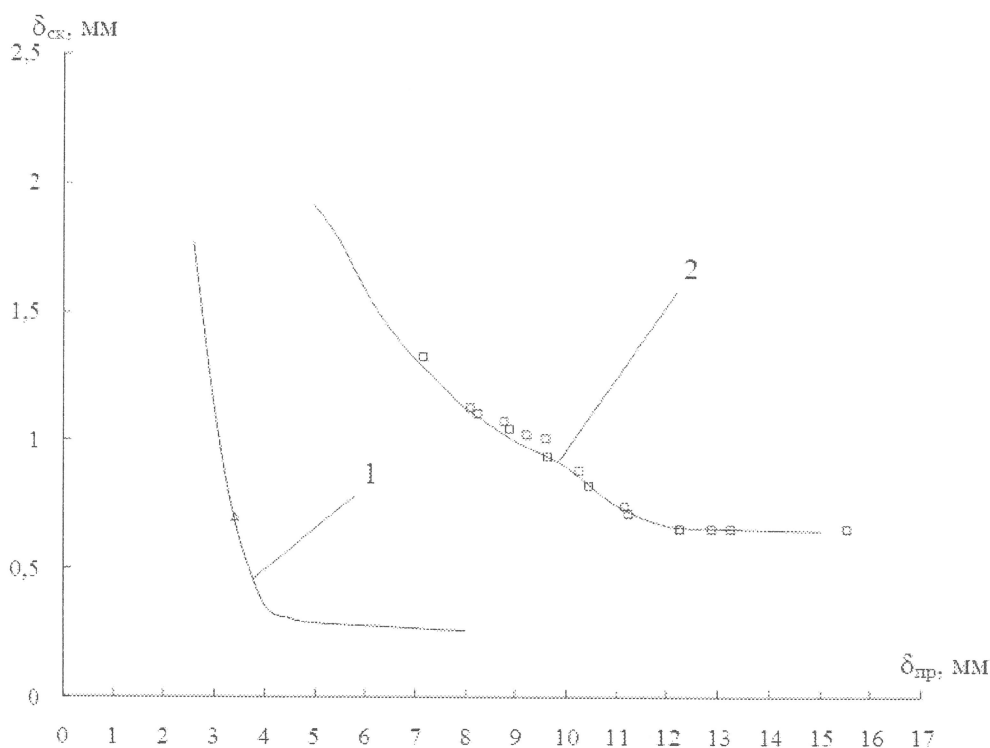
1 – R30; 2 – R45; 3 – R60; 4 – R90

Рисунок 2 – Зависимости толщины сухого слоя ($\delta_{\text{сух}}$) краски «Nullifire S607-HB» от приведенной толщины ($\delta_{\text{пр}}$) стальных профилей при различных величинах фактических пределов огнестойкости



1 – R30; 2 – R45; 3 – R60; 4 – R90

Рисунок 3 – Зависимости толщины ($\delta_{ск}$) огнезащитного покрытия «Совер» от приведенной толщины ($\delta_{пр}$) стальных профилей при различных величинах фактических пределов огнестойкости



1 – R45; 2 – R90

Рисунок 4 – Зависимости толщины сухого слоя ($\delta_{ск}$) огнезащитной вспучивающейся краски «Interchar 963» от приведенной толщины ($\delta_{пр}$) стальных профилей при различных величинах фактических пределов огнестойкости

Анализ рисунков 1–4 показывает, что результаты расчета толщин сухого слоя огнезащитной краски с использованием предложенной методики расчета отличаются от экспериментально определенных значений в условиях «стандартного» пожара не более чем на 5 %.

Пример оптимизации толщин сухого слоя краски «*Renitherm PMS-R*»

Рассмотрена модельная задача оптимизации толщин огнезащитного покрытия, наносимого на несущие стальные строительные конструкции многофункционального торгового центра и обеспечивающего требуемый предел огнестойкости $R90$.

Площадь торгового зала центра равна 3888 м^2 , высота зала составляет 6,9 м.

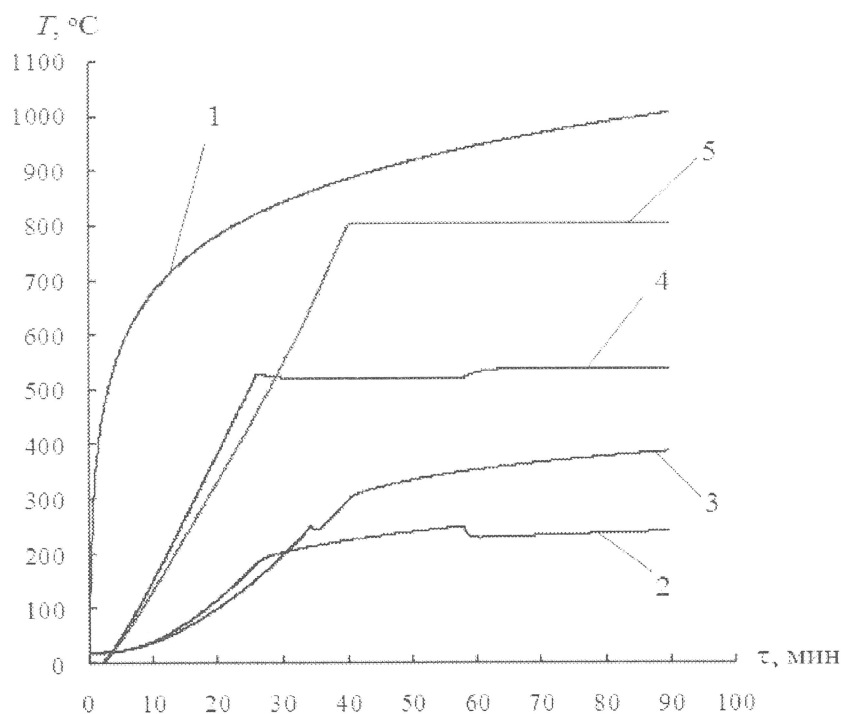
Свойства типовой пожарной нагрузки в рассматриваемом помещении принимались по типовой базе пожарной нагрузки [17]: здание I–II степени огнестойкости (мебель+бытовые изделия) и промтовары с текстильными изделиями.

Принимаем, что системы пожаротушения, механической вентиляции и дымоудаления отключены (свободное развитие пожара в соответствии с [18]).

Начальные условия задавались следующими: температура в помещении $T_0=293 \text{ K}$; давление в помещении (равно атмосферному) $P=101300 \text{ Па}$.

В качестве условия потери стальной конструкцией ее несущей способности принимаем момент достижения температурой наружной поверхности стенки конструкции ее критического значения $T_{кр}=500 \text{ °C}$ [11]. Расчет проводится до 90 мин от начала горения или до прекращения горения из-за недостатка кислорода или горючего материала в помещении.

На рисунке 5 представлены зависимости температур от времени с начала пожара в торговом зале, выполненные с использованием модифицированных интегральной [2] (кривые 2 и 3) и зонной [12] (кривые 4 и 5) моделей.



среднеобъемная температура: 1 – при «стандартном» пожаре; 2 – при реальном пожаре в здании I–II степени огнестойкости; 3 – при горении промтоваров и текстильных изделий на реальном пожаре; температура на уровне перекрытия: 4 – при реальном пожаре в здании I–II степени огнестойкости; 5 – при горении промтоваров и текстильных изделий на реальном пожаре

Рисунок 5 – Зависимости температур от времени

Из рисунка 5 видно, что наиболее опасный температурный режим пожара является менее «жестким», чем «стандартный» режим пожара.

Результаты расчета толщин сухого слоя краски «*Renitherm PMS-R*», наносимого на стальные конструкции торгового зала в условиях реального пожара (рисунок 5), представлены в таблице. В случае балок перекрытий учитывается установка подвесных потолков типа «Армстронг» с фактическим пределом огнестойкости по их металлическим конструкциям, равным *R15*.

Из таблицы видно, что толщина сухого слоя краски, наносимого на стальные несущие конструкции перекрытия, более чем в 2 раза меньше соответствующей толщины, определяемой в зависимости от приведенной толщины конструкции по сертификату пожарной безопасности («стандартный» пожар) [7, 8].

Таблица – Толщина сухого слоя краски в зависимости от приведенной толщины несущих стальных профилей перекрытий и колонн при величине фактического предела огнестойкости *R90*

Приведенная толщина стали, $\delta_{пр}$, мм	Толщина сухого слоя краски, $\delta_{ск}$, мм		
	для колонн	для перекрытий	для перекрытий с учетом подвесного потолка
4,0	2,37	1,19	0,95
5,0	1,96	0,98	0,80
5,5	1,80	0,90	0,73
6,0	1,62	0,81	0,67
6,5	1,53	0,77	0,63
7,0	1,43	0,72	0,59
7,5	1,34	0,67	0,55
8,0	1,27	0,64	0,52
9,0	1,25	0,63	0,50
10,0	1,24	0,62	0,49
11,0	1,23	0,61	0,48
12,0	1,22	0,60	0,47

Заключение. Учет динамики изменения основных параметров реального пожара позволяет обеспечить необходимый предел огнестойкости стальных конструкций при значительно меньшем расходе огнезащитного состава. Это существенно увеличивает экономическую эффективность проведения работ по огнезащите за счет уменьшения количества используемой огнезащитной краски и в то же время обеспечивает устойчивость здания при пожаре.

Оптимизация толщин сухого слоя вспучивающейся краски, наносимой на стальные конструкции помещений здания, может быть выполнена по предложенной математической модели с учетом реальной термогазодинамической картины пожара, теплофизических и химических свойств находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, а также геометрических размеров помещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система нормативных документов в строительстве. Пожарная безопасность зданий и сооружений: СНиП 21-01-97*. – Введ. 01.01.98. – М.: Госстрой России: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1997. – 15 с.

2. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
3. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля: ГОСТ Р 12.3.047-98. – Введ. 01.01.2000. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1998. – 88 с.
4. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (к СНиП II-2-80). – М.: Стройиздат, 1985. – 64 с.
5. Еремина, Т.Ю. Моделирование и оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных составов / Т.Ю. Еремина // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – Т. 12, № 5. – С. 22–29.
6. Краска огнезащитная «ТЕРМА» для защиты стальных конструкций: ТУ 2316-020-47935838-2003 (с изм.1). – Введ. 01.01.2004. – ООО «Научный инновационный центр строительства и пожарной безопасности», 2004.
7. Покрытие огнезащитное для стальных конструкций «Renitherm PMS-R»: Сертификат пожарной безопасности ССПБ.DE.ОП.002.В.01390 от 24.02.2004 г.
8. Огнезащитный состав для стальных конструкций «Renitherm PMS-R»: Сертификат пожарной безопасности ССПБ.DE.ОП.032.П.00081 от 07.09.2005 г.
9. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – 5-е изд. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
10. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с.
11. Яковлев, А.Я. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.Я. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
12. Пузач, С.В. Модифицированная зонная модель расчета тепломассообмена при пожаре в атриуме / С.В. Пузач, Е.С. Абакумов // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 1. – С. 53–57.
13. Огнезащитный вспучивающийся состав «Nullifire S607-HB» на водной основе: Сертификат пожарной безопасности ССПБ.GB.ОП.014.H.00941 от 03.03.2007 г.
14. Болдырев, А.С. Строительные материалы: Справочник / А.С. Болдырев, П.П. Золотов. – М.: Стройиздат, 1989. – 567 с.
15. Вспучивающаяся однокомпонентная огнезащитная система *Interchar 963*: Сертификат ССПБ.8E.ОП014.В.00585 от 10.01.2005.
16. Покрытие огнезащитное «СОВЕР»: ТУ 5767-001-43545684-2006.
17. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
18. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 01.07.1992. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 88 с.