

# О КОМПЛЕКСНОМ ПОДХОДЕ К ВОПРОСАМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

*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.*

2009

**П**ри анализе пожарной опасности в соответствии с нормативными документами (СНИП 21-01-97\* «Пожарная безопасность зданий и сооружений») 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 системы противопожарной защиты.

При определении огнестойкости строительных конструкций вопрос точности и надежности метода расчета теплообмена

при пожаре является ключевым. Сложность разработки такого метода заключается в многофакторности и нелинейности задачи.

В действующих нормах пожарной безопасности фактические пределы огнестойкости устанавливаются на основе определения эквивалентной продолжительности пожаров и коэффициента огнестойкости (ГОСТ Р 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля») или по экспериментальным данным по поведению конкретной конструкции в условиях «стандартного» пожара. Однако такой подход не учитывает ре-

## ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

альные условия пожара на конкретном объекте, такие как, например, реальный термодинамический 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. 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:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial t}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала конструкции;  $c$  – удельная теплоемкость материала конструкции;  $T$  – температура;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала конструкции;  $y$  – координата, направленная по толщине материала;  $t$  – время.

Уравнение (1) решается численным методом контрольных объемов.

Граничные условия к уравнению (1) имеют вид:

– наружная (нагреваемая) поверхность огнезащитного покрытия:

граничные условия 3-го рода:

а) «стандартный» пожар:

температура среды ( $T_m$  изменяется в соответствии с кривой «стандартного» пожара:

$$T_m = 3451g(0,133\tau + 1) + T_0; \quad (2)$$

коэффициент теплоотдачи ( $A$ ) от газовой среды к поверхности конструкции равен:

$$\alpha = 29 + 5,75\epsilon_{np} \frac{(T_m/100)^4 - (T_b/100)^4}{T_m - T_b} \quad (3)$$

б) реальный пожар:

для стен и колонн:

$$q_{w1} = A^* (T_m - T_{w1});$$

$$A^*_w = 15,9 \Psi r_1^{0,222}; \quad (4)$$

для перекрытия:

$$q_{c1} = A^*_c (T_m - T_{c1});$$

$$\alpha_{c1} = 17,2 \Psi r_1^{0,222} / [1 - 0,127 \Psi r_1^5 \exp(-1,69 \Psi r_1)], \quad (5)$$

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;  $A^*_w$  и  $A^*_c$  – приведенные коэффициенты теплоотдачи стен (колонн) и перекрытия;  $\Psi r_1 = M_0/F_w$ ;  $M_0$  – начальная масса пожарной нагрузки;  $F_w$  – суммарная площадь внутренней поверхности стен и перекрытия;  $E_{np}$  – приведенная степень черноты газовой среды помещения и облучаемой поверхности;

– внутренняя поверхность стальной конструкции колонны: коэффициент теплоотдачи  $A = 0$  Вт/(м<sup>2</sup> К) (адиабатная стенка);

– ось симметрии стальной конструкции перекрытия:  $\partial T / \partial y = 0$ ,

где  $T_0$  – начальная температура;  $T_b$  – температура наружной (нагреваемой) поверхности огнезащитного покрытия.

Температура на поверхности слоя огнезащитной краски из-за низкой величины коэффициента теплопроводности быстро достигает значения, при которой заканчивается вспучивание огнезащитного покрытия и его стабилизация. Вышеуказанное критическое значение температуры составляет, напри-

## ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

мер, для состава «Терма» 177°C и 230°C 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.

Предполагаем 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.

Для расчета термогазодинамики пожара в помещении, необходимой для определе-

ния граничных условий к уравнению (1), используются модифицированные интегральный и зонный методы расчета.

Тестирование математической модели. Тестирование модели проводилось на данных по сертификационным испытаниям в условиях «стандартного» пожара огнезащитных вспучивающихся красок «Терма», «Нуллифаер», Renitherm PMS-R и Interchar 963, а также огнезащитного покрытия «Совер».

Теплофизические свойства стальных конструкций помещений определялись по:

- плотности:  $P = 7\,800$  кг/куб. м;
- удельной теплоемкости:  $c = 470 + 0,211 + 5,0 \cdot 10^{-4} t$  Дж/(кг·К);
- коэффициенту теплопроводности:  $\Lambda = 58 - 0,042 \cdot t$  Вт/(м·К), где  $t$  – температура в градусах Цельсия.

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

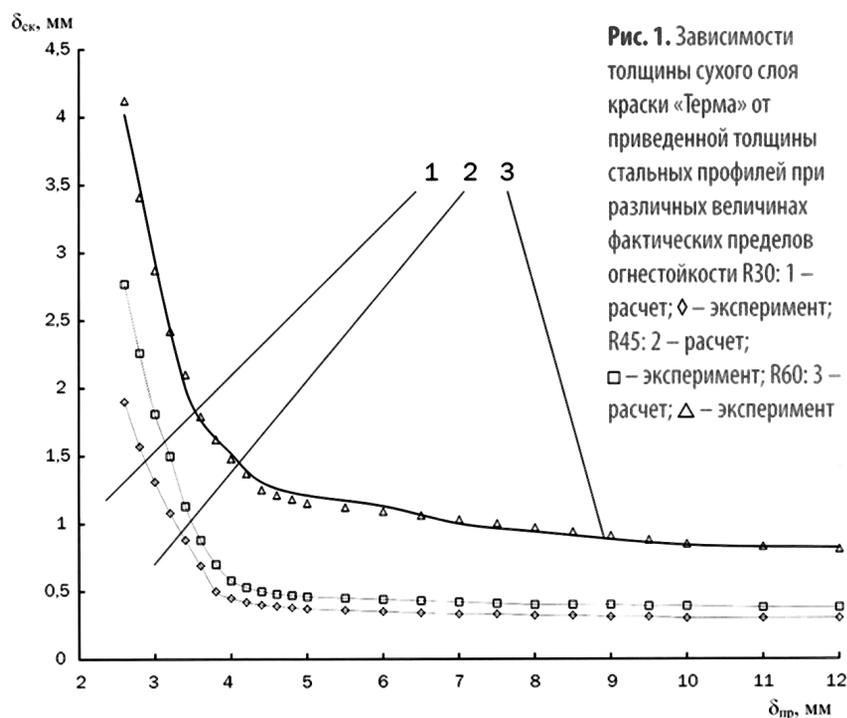


Рис. 1

## ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

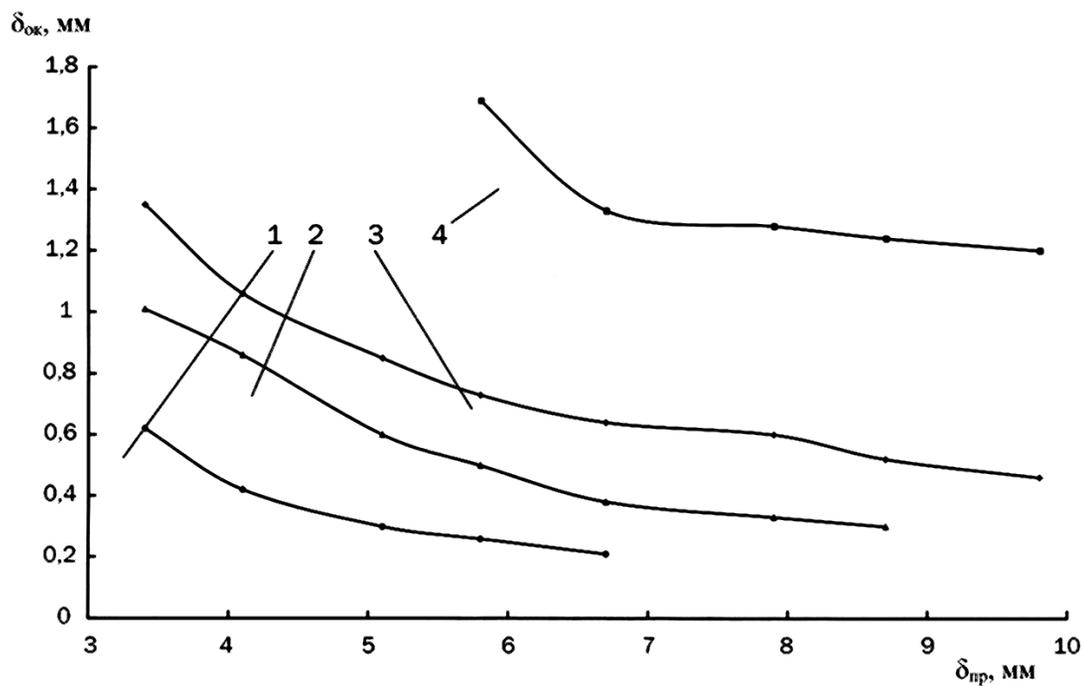


Рис. 2. Зависимости толщины сухого слоя краски «Нуллифаер» от приведенной толщины стальных профилей при различных величинах фактических пределов огнестойкости 1 – R30; 2 – R45; 3 – R60; 4 – R90

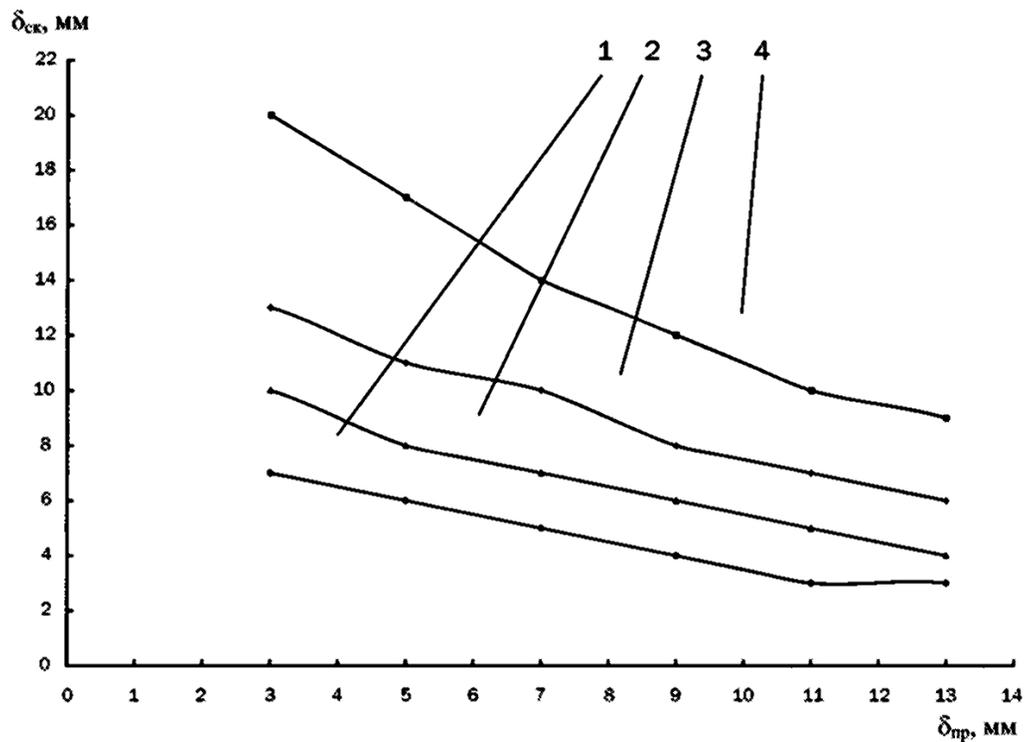
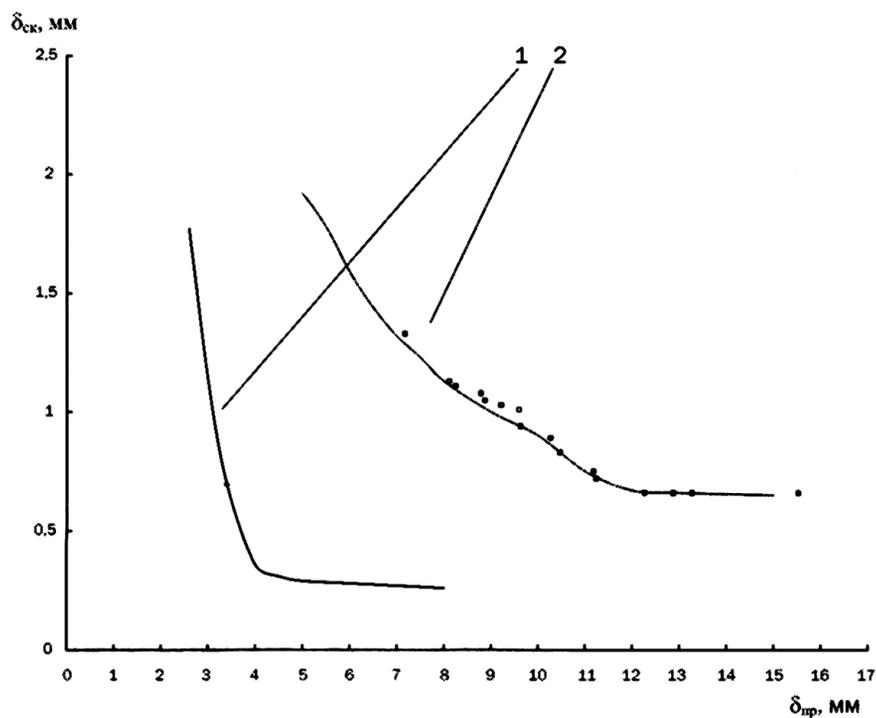


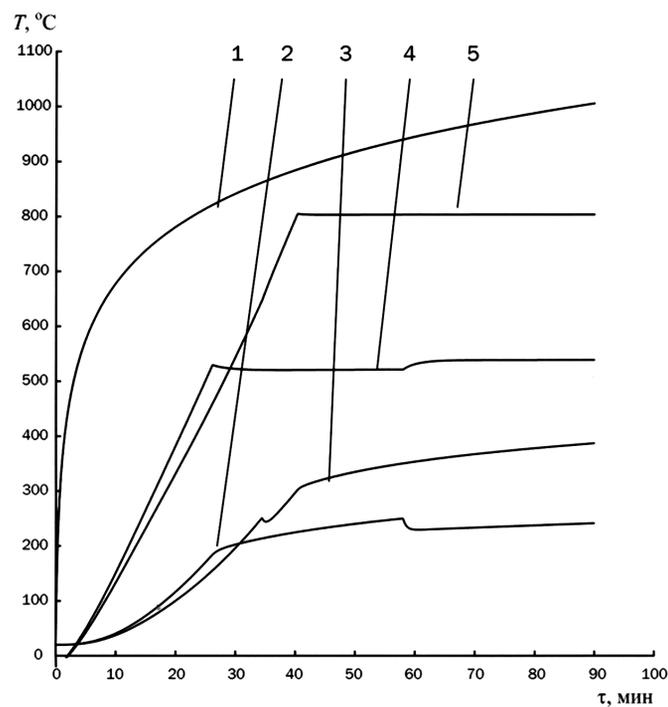
Рис. 3. Зависимости толщины огнезащитного покрытия «Совер» от приведенной толщины стальных профилей при различных величинах фактических пределов огнестойкости 1 – R30; 2 – R45; 3 – R60; 4 – R90



## ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



**Рис. 4. Зависимости толщины сухого слоя огнезащитной вспучивающейся краски Interchar 963 от приведенной толщины стальных профилей при различных величинах фактических пределов огнестойкости 1 – R30; 2 – R45; 3 – R60; 4 – R90**



**Рис. 5. Зависимости температур от времени 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре; среднеобъемная температура при реальном пожаре: 2 – здание I – II ст. огнестойкости; 3 – промтовары; текстильные изделия; температура на уровне перекрытия: 4 – здание I – II ст. огнестойкости; 5 – промтовары; текстильные изделия**

2009

## ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Обозначения на рис. 1-4 следующие:

$\Delta_{\text{ск}}$  – толщина сухого слоя огнезащитной краски;

$\Delta_{\text{пр}}$  – приведенная толщина стальных конструкций.

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

краска «Терма»: плотность  $P = 0,8$  кг/куб. м; эффективный коэффициент теплопроводности  $\Lambda_{\text{эф}} = 0,05-0,32$  Вт/(м·К);

краска Interchar 963:  $P = 0,8$  кг/куб. м;  $\Lambda_{\text{эф}} = 0,2-0,4$  Вт/(м·К);

огнезащитное покрытие «Совер»:  $P = 250$  кг/куб. м;  $\Lambda = 0,06-0,12$  Вт/(м·К).

Для определения теплофизических свойств огнезащитной вспучивающейся краски Renitherm PMS-R при использовании предложенной математической модели использовались следующие исходные данные:

- коэффициент вспучивания  $kv=40$ ;
- фактический предел огнестойкости R45: толщина сухого слоя  $\Delta_{\text{ск}} = 1,0$  мм; приведенная толщина стальной конструкции  $\Delta_{\text{п}} = 3,4$  мм;
- R60:  $A = 1,2$  мм;  $\Delta = 4,2$  мм;
- R90:  $A = 1,7$  мм;  $\Delta = 5,8$  мм.

Анализ рис. 1-4 показывает, что результаты расчета толщин сухого слоя огнезащитной краски с использованием предложенной методики расчета отличаются от экспериментальных значений в условиях «стандартного» пожара не более 5 %.

Пример оптимизации толщин сухого слоя краски Renitherm PMS-R. Рассмотрена модельная задача оптимизации толщин ог-

незащитного покрытия, наносимого на несущие стальные строительные конструкции многофункционального торгового центра и обеспечивающего требуемый предел огнестойкости R90.

Площадь торгового зала центра равна 3 888 кв. м, высота зала составляет 6,9 м.

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

Принимаем, что системы пожаротушения, механические вентиляции и дымоудаления отключены (свободное развитие пожара в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 «ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования»).

Начальные условия задавались следующими параметрами: температура в помещении  $T_0 = 293$  К; давление в помещении (равно атмосферному)  $p = 101\,300$  Па.

В качестве условия потери стальной конструкцией ее несущей способности принимаем момент достижения температурой наружной поверхности стенки конструкции ее критического значения  $T_p = 500^\circ\text{C}$ .

Расчет проводится до 90 мин от начала горения или до прекращения горения из-за недостатка кислорода или горючего материала в помещении.

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

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

## ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Таблица.

**Толщина сухого слоя краски в зависимости приведенной толщины несущих стальных профилей перекрытий и колонн при величине фактического предела нестойкости R 90**

Приведенная толщина стали, $\delta_{пр}$ , мм	Толщина сухого слоя краски*, $\delta_{ск}$ , мм
4,0	2,37 (1,19; 0,95**)
5,0	1,96 (0,98; 0,80**)
5,5	1,8 (0,9; 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 (0,6; 0,47**)

Результаты расчета толщин сухого слоя краски Renitherm PMS-R, наносимого на стальные конструкции торгового зала в условиях реального пожара (рис. 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).

Таким образом, получена существенная экономия расхода огнезащитной краски

без снижения величины огнестойкости стальных конструкций.

**Вывод.** 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 с целью минимизации затрат на огнезащиту.

**С. Пузач,**

*д.т.н., профессор*

**Р. Горностаев,**

*адъюнкт Академии ГПС МЧС России*

**Е. Абакумов,**

*адъюнкт Академии ГПС МЧС России*

2009