

А. В. ТЕПЛОУХОВ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,
АО "Корпорация "МИТ" (Россия, 127273, г. Москва, Березовая аллея, 10;
e-mail: avt3108@mail.ru)

В. Г. ЗВЕРЕВ, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией,
Томский государственный университет (Россия, 634050, г. Томск,
просп. Ленина, 36; e-mail: zverev@niipmm.tsu.ru)

А. Н. ГАРАЩЕНКО, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник,
ОАО "ЦНИИСМ" (Россия, 41371, Московская обл., г. Хотьково,
ул. Заводская, 1; e-mail: a.n.gar@mail.ru)

УДК 624.014:678.049.91

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Предложена методика оценки влияния длительной эксплуатации конструкций на основные свойства вспучивающихся огнезащитных покрытий, основанная на экспериментальной оценке изменения кратности вспучивания покрытий и степени их термического разложения в зависимости от сроков эксплуатации и учета этих показателей при математическом моделировании и проектировании огнезащиты. Проведено апробирование методики на примере состава СГК-2. Для оценки изменения показателей вспучивания, термического разложения, а также основных физико-механических свойств проведены эксперименты на образцах, прошедших ускоренные климатические испытания. Представлены результаты прогнозирования огнестойкости строительных конструкций из стали, защищенных покрытием СГК-2, при стандартном температурном режиме пожара на период эксплуатации до 25 лет.

Ключевые слова: огнезащита; анализ; вспучивающиеся покрытия; огнезащитное покрытие; эксплуатация конструкций.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.9-16

Введение

В настоящее время при экспериментальных исследованиях и проектировании средств огнезащиты строительных конструкций, а также конструкций и изделий специального назначения практически не рассматривается возможное влияние длительной эксплуатации (т. е. эксплуатации в течение жизненного цикла) разрабатываемых конструкций и изделий на огнезащитную эффективность и свойства используемых материалов и покрытий. Это, естественно, касается и огнезащитных вспучивающихся покрытий (ОВП), большинство которых имеют полимерную основу и подвержены старению [1]. Очевидно, что степень влияния длительной эксплуатации на огнезащитную эффективность может оцениваться при испытаниях металлоконструкций с конкретным средством огнезащиты в огневых печах по стандартизованным методикам. Однако это дорогостоящие испытания, которые требуют изготовления образцов конструкций с огнезащитой, состаренной с учетом необходимого периода эксплуатации.

Помимо огнезащитной эффективности, чрезвычайно важное значение имеет оценка изменения со временем физико-механических и эксплуатационных свойств огнезащитных материалов. Известно, например, что в процессе эксплуатации строительных объектов фиксировались случаи отслоения ОВП из-за снижения адгезии к металлоконструкциям. Это свидетельствует о том, что, помимо контроля за качеством применяемых материалов, соблюдением технологии их нанесения и условий эксплуатации, необходима оценка изменения со временем всех основных огнезащитных и эксплуатационных свойств ОВП. Исследования перечисленных свойств должны проводиться для различных материалов, из которых должны выбираться материалы с наиболее приемлемыми и стабильными показателями.

Все вышесказанное свидетельствует об актуальности выработки единого подхода к оценке влияния длительной эксплуатации конструкций на основные свойства вспучивающихся огнезащитных покрытий. При этом необходимо опираться на относи-

тельно недорогие и простые методики лабораторных исследований образцов, прошедших ускоренные климатические испытания. При подготовке соответствующих методик к применению целесообразно использовать задел, накопленный при отработке изделий военной техники, для которых подтверждение характеристик материалов с учетом требуемых сроков их эксплуатации является обязательным.

В настоящей статье приведена методика по оценке влияния длительной эксплуатации металлических конструкций на огнезащитную эффективность вспучивающегося покрытия СГК-2, используемого для защиты изделий военной техники и конструкций строительных объектов, и представлены полученные в экспериментах результаты ее реализации.

Состояние вопроса

На сегодняшний день отсутствует общепринятая методика, позволяющая прогнозировать изменение огнезащитной эффективности материалов и огнестойкости конструкций в процессе эксплуатации. Контроль свойств огнезащитных покрытий после их нанесения сводится к визуальным наблюдениям за состоянием материала (наличие отслоений, трещин и пр.) и оценке уровня адгезии к подложке. Этого явно недостаточно, так как в процессе эксплуатации возможны изменения структуры покрытия на молекулярном уровне без проявления каких-либо внешних признаков.

В технической литературе ранее уже рассматривалась возможность оценки долговечности покрытий с помощью методов термического анализа. Однако оказалось, что на основании данных термического анализа материалов в процессе эксплуатации (либо после ускоренных климатических испытаний) можно только установить факт изменения свойства материала, но выполнить при этом количественную оценку (даже в случае существенных изменений) крайне затруднительно. Кроме того, по одному изменению массы материала нельзя однозначно судить об изменении величины вспучивания покрытия, за счет которого в значительной степени обеспечивается огнезащитная эффективность. Тем не менее данные методы, несомненно, применимы для идентификации материалов [2–4].

В качестве альтернативы дорогостоящим испытаниям конструкций с огнезащитой в огневых печах могут рассматриваться лабораторные испытания. Так, установка для проведения испытаний по методике [5] представляет собой муфельную печь с нагревательными элементами, с помощью которых реализуется подходящий режим нагрева, в частности стандартный тепловой. Широкими возможностями по воспроизведению необходимого уровня нагрева образцов и фрагментов конструкций обла-

дают стенды лучистого нагрева [6]. Такой подход позволяет получить требуемый объем информации при хорошей воспроизводимости результатов и значительно меньших материальных и временных затратах, чем при испытаниях в огневых печах.

Исследование существующих ОВП в процессе эксплуатации предполагает изучение широкого спектра их свойств, влияющих на огнезащитную эффективность материала и его эксплуатационные характеристики. Исследования необходимо проводить на образцах материала, прошедших климатические испытания [7], находящихся на длительном хранении или работающих в составе конструкций в реально складывающихся условиях.

В настоящее время разработаны методики расчетов, позволяющие моделировать процесс работы вспучивающихся покрытий, оценивать их огнезащитную эффективность и определять необходимую толщину огнезащиты с учетом возможного изменения их свойств [7–11]. Как показали результаты математического моделирования тепломассопереноса в ОВП, их эффективность в значительной степени зависит от изменения толщины вспученного слоя, а в число наиболее значимых параметров входят кратность вспучивания и температура начала интенсивного вспучивания [10, 12]. Для учета кратности вспучивания может использоваться методика испытаний образцов в мерных трубках из термостойкого стекла, нагрев которых осуществляется в муфельной печи [13], а также методика, предусматривающая испытания образцов на установке (стенде) лучистого нагрева [6]. Необходимо также определение потери массы материала, которое может быть осуществлено традиционными методами термического анализа.

Цель и задачи исследований

Целью работы является создание и апробирование методики оценки влияния длительной эксплуатации конструкций на огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий на примере состава СГК-2. В качестве объекта исследований выбраны образцы в виде стальных пластин с нанесенным на них слоем огнезащитного покрытия СГК-2 толщиной 2 мм. Эффективность покрытия и его стабильность оцениваются на период эксплуатации до 25 лет. Рассматривается стандартный температурный режим пожара; предельно допустимая температура для металлоконструкций принимается равной 500 °С.

Результаты исследований

Особенности терморасширяющихся материалов не позволяют напрямую применять стандартные методики теплофизического эксперимента и дела-

ют невозможным использование стандартного промышленного оборудования. Отмечая значимость влияния процесса вспучивания ОВП на его огнезащитную эффективность, для исследований применяли методику, основанную на термостатировании образцов в муфельной печи с дискретным шагом на заданном интервале температур [13].

Схема проведения испытаний приведена на рис. 1. Образцы, представляющие собой двухслойную систему *покрытие – подложка*, помещаются в мерные трубки с плоским дном из термостойкого стекла. Наличие подложки необходимо для моделирования реальной картины эксплуатации покрытия. Воздействие температуры на систему приводит к изменению состояния вспучивающегося материала как по объему, так и по массе. Так как расширение материала происходит в одном и том же направлении — вдоль трубки, изменение объема легко фиксируется по толщине образца покрытия. Используя стандартное лабораторное оборудование, достаточно просто определить искомые характеристики: относительное изменение толщины или кратность вспучивания θ и относительное изменение массы m/m_0 для каждого значения температуры термостатирования T :

$$\theta(T) = \frac{dh}{h_0}; \quad \bar{m}(T) = \frac{m}{m_0}; \quad dh(T) = h - h_0,$$

где h, m — толщина и масса образца покрытия; индекс “0” соответствует начальным значениям.

Совокупность указанных показателей ($\theta, m/m_0$) индивидуально характеризует соответствующую реакцию вспучивающегося огнезащитного материала на изменение термодинамического состояния. Для адекватного моделирования процессов тепло-массообмена в защищаемых конструкциях с учетом времени их эксплуатации необходимо определить показатели стабильности этих характеристик с использованием методики проведения ускоренных климатических испытаний (УКИ), имитирующих 5, 10, 15, 20 и 25 лет эксплуатации ОВП [14].

Искусственному старению на заданный период эксплуатации подвергали стальные пластины с геометрическими размерами $200 \times 200 \times 1$ мм, на которые было нанесено огнезащитное покрытие СГК-2 толщиной около 2 мм. После этого из пластин торцевой фрезой вырезали таблетки диаметром примерно 17,5 мм. Подготовленные таким образом образцы материала помещали на дно цилиндрических мерных трубок, внутренний диаметр которых на 0,1–0,2 мм превышал диаметр таблетки с подложкой.

Для проведения экспериментов использовали муфельную печь, обеспечивающую нагрев до 700°C с шагом 25°C . Необходимый температурный режим

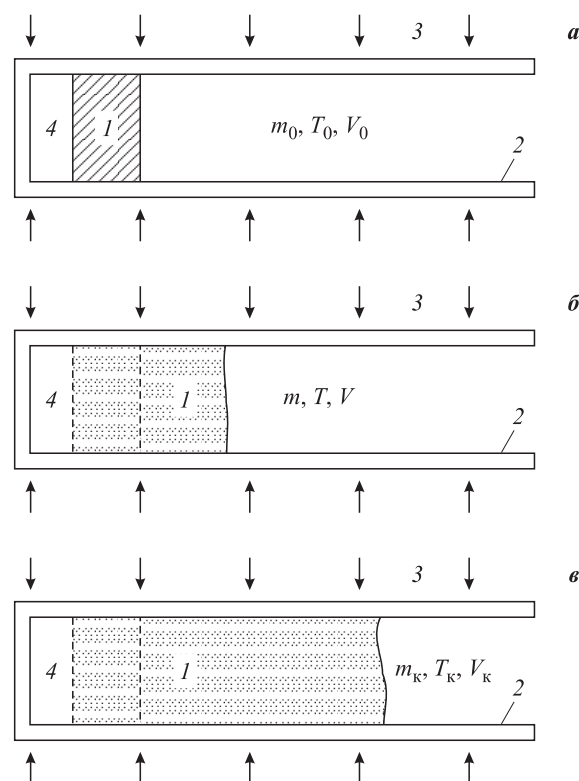


Рис. 1. Схема проведения эксперимента и различные физико-механические состояния образца ОВП на подложке при термостатировании: а — начальное; б — текущее (умеренные температуры); в — конечное (высокие температуры); 1 — образец (вспученный слой); 2 — цилиндр из термостойкого стекла; 3 — тепловой поток; 4 — подложка; m, T, V — текущие значения массы, температуры и объема образца; индексы “0” и “к” соответствуют начальным и конечным значениям указанных характеристик

в печи поддерживался автоматически. Цилиндры с образцами устанавливали в муфельную печь горизонтально и выдерживали в течение 30 мин при заданной температуре термостатирования.

Воздействие температуры на образец приводило к изменению объема и массы вспучивающегося покрытия СГК-2 на подложке. При температурах порядка 250°C имело место заметное изменение объема материала с образованием относительно плотной пористой структуры. При термостатировании покрытия при температурах более 300°C начиналась вторая стадия вспучивания, характеризующаяся значительным увеличением объема (почти в 20 раз) и образованием рыхлой пористой структуры. В интервале температур от 300 до 450°C происходил активный выход газообразных продуктов разложения и, как следствие, потеря массы образца покрытия. Об этом можно было судить по изменению цвета стеклянных трубок. При температуре выше 450°C наблюдалось выгорание конденсированных продуктов разложения на стенках трубки.

Для исключения влияния случайных факторов и оценки погрешности эксперимента при одной и

той же температуре одновременно выдерживали по 3–5 образцов на каждой стадии УКИ при варьировании толщины покрытия СГК-2 от 1,8 до 2,2 мм. Было установлено, что в условиях однородного изотермического нагрева относительное изменение объема и массы образцов не зависит от их начальной толщины и диаметра, что отвечает понятию элементарного объема материала и физической природе процесса вспучивания.

Вспучивание приводит к образованию рыхлой (пористой) структуры (см. рис. 1), большую часть объема которой занимает газовая фаза. Ввиду этого для объективной характеристики состояния образца использовали текущие значения плотности и пористости пенококса, обусловленные только процессами вспучивания и потери массы исходного твердого материала.

На рис. 2, исходя из постановки задачи, представлены результаты экспериментальных исследований в виде удобных для анализа кривых θ и m/m_0 , соответствующих времени эксплуатации 0, 15 и 25 лет; при этом кратность вспучивания θ была отнесена к своему максимальному значению $\theta_{\max 0} = 25,0$ для исходного образца до проведения УКИ.

Кривые на рис. 2,а свидетельствуют о том, что вспучивание материала СГК-2 носит двухстадийный характер, который остается неизменным в процессе эксплуатации. Первая стадия соответствует диапазону температур от 150 до 250 °С, вторая активно протекает при температурах 250–400 °С. Далее покрытие расширяется слабо, и равновесная кривая вспучивания выходит на свое асимптотическое значение.

Из анализа кривых относительного изменения массы материала СГК-2 (см. рис. 2,б) следует, что наиболее активно термохимическое разложение проходит в диапазоне температур от 200 до 450 °С. При более высоких температурах процесс стабилизируется, выход коксового остатка остается неизменным и составляет порядка 0,5.

Экспериментальные исследования показали, что при проведении климатических испытаний, имитирующих эксплуатацию материала металлоконструкций с огнезащитой, происходит незначительный сдвиг всех кривых исследуемых характеристик в высокотемпературную область. При этом наблюдается некоторое уменьшение кратности вспучивания покрытия. Причины такого поведения кривых вспучивания и изменения массы, вероятно, определяются процессами структурирования полимерного материала [1]. По мере увеличения времени эксплуатации выделяются легколетучие газообразные вещества, что ведет к некоторому упрочнению структуры покрытия и, как следствие, к снижению кратности вспучивания и сдвигу кривых по температуре.

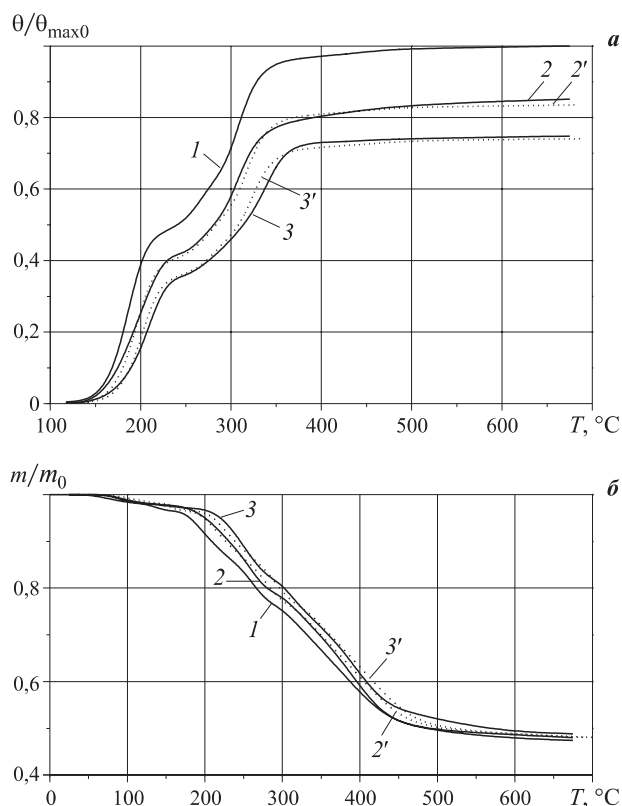


Рис. 2. Относительное изменение кратности вспучивания (а) и массы (б) материала СГК-2 в зависимости от температуры термостатирования до эксплуатации (1), после 15 лет (2, 2') и 25 лет (3, 3') эксплуатации: 1–3 — эксперимент; 2', 3' — расчет

На основе полученных экспериментальных данных были определены показатели стабильности рассматриваемых характеристик $I_{\bar{m}}$ и I_{θ} . Для их определения предложены следующие функциональные зависимости от времени эксплуатации конструкций:

$$I_{\theta}(T, t_{\text{exp}}) = \frac{\theta(T + at_{\text{exp}})}{\theta(T)} e^{-bt_{\text{exp}}}; \quad (1)$$

$$I_{\bar{m}}(T, t_{\text{exp}}) = \frac{\bar{m}(T + ct_{\text{exp}})}{\bar{m}(T)}, \quad (2)$$

где $a = 0,6$; $b = 0,012$; $c = 1,2$.

Значения коэффициентов a , b и c в зависимостях (1) и (2) определены путем аппроксимации результатов, представленных на рис. 2.

Необходимо отметить, что предложенные функциональные зависимости хорошо согласуются с имеющимися представлениями о старении конструкционных материалов [1] и могут быть использованы для широкого класса огнезащитных покрытий на основе полимерных связующих с определением значений соответствующих коэффициентов, входящих в выражения (1) и (2).

Проведены расчетные оценки, демонстрирующие степень влияния времени эксплуатации конструкций

на огнезащитную эффективность покрытия СГК-2. Для расчета времени достижения конструкцией с различной приведенной толщиной металла $\delta_{\text{прив}}$ критической температуры $t_R = 500^\circ\text{C}$ использовалась методика теплотехнических расчетов [15], разработанная в ЗАО НПП «Спецэнерготехника» и согласованная со Всероссийским научно-исследовательским институтом противопожарной обороны МЧС России. В результате параметрических расчетов были получены и приведены в методике [15] номограммы, представляющие собой зависимости t_R от $\delta_{\text{прив}}$ для различных значений толщины покрытия СГК-2. На основании полученных соотношений для $\bar{m}$ и θ определены зависимости t_R от $\delta_{\text{прив}}$ для покрытия толщиной 2 мм с учетом сроков эксплуатации конструкции 15 и 25 лет соответственно (рис. 3).

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, показывает, что максимальное падение огнезащитной эффективности ОВП СГК-2 толщиной 2 мм достигает почти 25 %.

Для получения объективной оценки изменения огнезащитной эффективности в процессе эксплуатации покрытия были проведены испытания образцов состава СГК-2 толщиной 2 мм на установке (стенде) лучистого нагрева СИН-1 [6]. Покрытие наносили на стальные пластины толщиной 2 мм. Образцы подвергали искусственному старению по методике УКИ. На рис. 4 представлены результаты измерения температуры пластин при воспроизведении на стенде лучистого нагрева условий воздействия на них при стандартном температурном режиме пожара, а также результаты расчетов с учетом предложенных функциональных зависимостей (1) и (2) для указанных условий испытаний.

Анализ расчетных и экспериментальных зависимостей, приведенных на рис. 4, свидетельствует

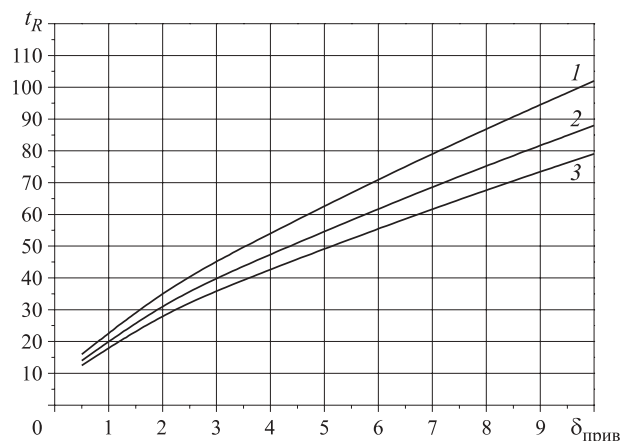


Рис. 3. Зависимость времени достижения конструкцией из стали критической температуры $t_R = 500^\circ\text{C}$ от приведенной толщины металла при толщине покрытия СГК-2, равной 2 мм, до эксплуатации (1), после 15 лет (2) и 25 лет (3) эксплуатации

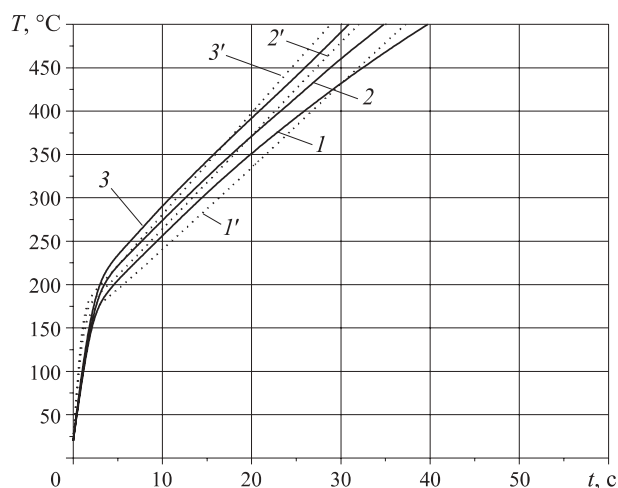


Рис. 4. Зависимости температуры стальной пластины толщиной 2 мм с покрытием СГК-2 от времени нагрева на установке СИН-1, полученные экспериментально (1–3) и расчетом (1'–3') для конструкции до эксплуатации и после 15 и 25 лет эксплуатации соответственно

об их удовлетворительном согласовании. Сравнение кривых 1 и 3 показывает, что в данном случае снижение огнезащитной эффективности покрытия СГК-2, характеризуемой временем достижения конструкцией критической температуры 500°C , составляет 21–24 % за время эксплуатации 25 лет. Это согласуется с результатами представленного выше прогноза стабильности данной характеристики.

Заключение

На основе проведенных исследований состава СГК-2 установлена тенденция к снижению огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий при длительной эксплуатации защищаемых металлоконструкций. Предложена методика для учета данного влияния, основанная на экспериментальной оценке изменения кратности вспучивания покрытий и степени их термического разложения в зависимости от времени эксплуатации и использовании этих показателей при математическом моделировании и проектировании огнезащиты. Проведено апробирование методики в ходе экспериментальных и теоретических исследований состава СГК-2 на образцах, прошедших ускоренные климатические испытания для периода эксплуатации до 25 лет. Подобные результаты позволяют прогнозировать изменение со временем огнезащитной эффективности и оценить огнестойкость строительных конструкций из стали, защищенных ОВП.

Таким образом, продемонстрирована целесообразность и возможность создания единого подхода к оценке влияния длительной эксплуатации конструкций на огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий и учету этого фактора в практике исследований и проектирования огнезащиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старение и стабилизация полимеров / Под ред. М. Б. Неймана. — М. : Наука, 1964. — 332 с.
2. Дудеров Н. Г., Смирнов П. В., Пагановский Ю. К., Михайлова Е. Д., Молчадский О. И., Чиликин М. В. Идентификация веществ, материалов и средств огнезащиты перед испытаниями на пожарную опасность // Материалы Второго международного семинара “Пожаровзрывоопасность веществ и взрывозащита объектов”. — М., 1997.
3. Еремина Т. Ю., Крашенинникова М. В., Дмитриева Ю. Н., Семенов Д. С. Нормируемые требования к качеству огнезащитных покрытий при сдаче строительных объектов и применение методов термического анализа для прогнозирования долговечности покрытий // Пожаровзрывобезопасность. — 2007. — Т. 16, № 5. — С. 31–33.
4. Оценка качества огнезащиты и установления вида огнезащитных покрытий на объектах : руководство. — М. : ВНИИПО, 2011. — 39 с.
5. Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу : методика. — М. : ВНИИПО, 1998. — 19 с.
6. Зверев В. Г., Гольдин В. Д., Теплоухов А. В. Лучистый нагрев вспучивающихся теплозащитных покрытий // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2014. — Т. 57, № 8-2. — С. 142–147.
7. Теплоухов А. В. Оценка огнезащитной эффективности тонкослойных вспучивающихся покрытий в процессе длительной эксплуатации посредством исследования их теплофизических свойств // Труды МИТ. — 2011. — Т. 11. — Ч. 1. — С. 234–238.
8. Гаращенко А. Н., Кульков А. А., Васин В. П., Рудакова Т. А. Влияние состава и особенностей поведения вспучивающихся огнезащитных покрытий на их эффективность // Вопросы оборонной техники. — 2010. — Вып. 4. — Сер. 15. — С. 33–38.
9. Charles E. Anderson Jr., Donna K. Wauters. A thermodynamic heat transfer model for intumescent systems // International Journal of Engineering Science. — 1984. — Vol. 22, Issue 7. — P. 881–889. DOI: 10.1016/0020-7225(84)90036-3.
10. Zverev V. G., Golédin V. D., Nesmelov V. V., Tsimbalyuk A. F. Modeling heat and mass transfer in intumescent fire-retardant coatings // Combustion, Explosion, and Snock Waves. — 1998. — Vol. 34, issue 2. — P. 198–205. DOI: 10.1007/bf02672821.
11. Griffin G. J. The modeling of heat transfer across intumescent polymer coating // Journal of Fire Sciences. — 2010. — Vol. 28, Issue 3. — P. 249–277. DOI: 10.1177/0734904109346396.
12. Bartholmai M., Schriever R., Scharfel B. Influence of external heat flux and coating thickness on the thermal insulation properties of two different intumescent coatings using cone calorimeter and numerical analysis // Fire and Materials. — 2003. — Vol. 27, Issue 4. — P. 151–162. DOI: 10.1002/fam.823.
13. Зверев В. Г., Теплоухов А. В., Цимбалюк А. Ф. Исследование свойств и огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2014. — Т. 57, № 8-2. — С. 148–153.
14. Инструкция № 1014–73. Методы прогнозирования сроков службы полимерных материалов в изделиях. — М. : ВИАМ, 1974.
15. Расчетно-экспериментальная оценка теплоизолирующей способности и огнезащитной эффективности состава СГК-2 для металлоконструкций с заданным значением приведенной толщины конструкции. — М. : ВНИИПО, 2007.

Материал поступил в редакцию 10 июля 2015 г.

Для цитирования: Теплоухов А. В., Зверев В. Г., Гаращенко А. Н. Методика и результаты оценки влияния длительной эксплуатации конструкций на основные свойства вспучивающихся огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 1. — С. 9–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.9-16.

METHODOLOGY AND RESULTS OF ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF STRUCTURES LONG-TERM EXPLOITATION ON BASIC PROPERTIES OF THE INTUMESCENT FLAME-RETARDANT COATINGS

TEPLOUKHOV A. V., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Joint-Stock Company "Corporation "Moscow Institute of Thermal Technology" (Berezovaya Alleya, 10, Moscow, 127273, Russian Federation; e-mail address: avt3108@mail.ru)

ZVEREV V. G., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Chief of Laboratory, Tomsk State University (Lenina Avenue, 36, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: zverev@niipmm.tsu.ru)

GARASHCHENKO A. N., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Open Joint Stock Company "Central Research Institute for Special Machinery" (Zavodskaya St., 1, Khotkovo, Moscow Region, 141371, Russian Federation; e-mail address: a.n.gar@mail.ru)

ABSTRACT

The procedure of estimation of impact of long-term operation of various constructions on the main properties of intumescent flame retardant coatings is offered. It is based on an experimental evaluation of change of intumescence expansion rate of coatings and their thermal decomposition rate depending on the operating time and consideration of these indicators in mathematical modeling and design of fire protection.

Tests of this procedure is carried out on the example of SGK-2 compound applied on the samples which passed the accelerated climatic tests for the operating period of 5, 10, 15, 20 and 25 years. Definition of intumescence and thermal decomposition indices, the main physical and mechanical properties of the coating was carried out. To assess the dynamics of changes of intumescence value it was used the test procedure with samples placed inside gauge tubes made of the heat-resistant glass which were heated in muffle furnace. In addition samples were tested on the installation (stand) of radiant heating.

On the basis of conducted researches it was determined the decrease tendency of intumescence expansion rate and, respectively, flame retardant efficiency of coating during long-term operation of protected metal constructions. The methodology of accounting of such influence based on the obtained experimental data during mathematical modeling and design of fire protection due to previously developed and tested calculation methods.

On the basis of carried out experiments and calculations it was determined that decrease of flame retardant efficiency of SGK-2 coating, characterized by time while the protected steel construction is heated to the critical temperature (500 °C), amount to 21–25 % over the lifetime of 25 years. The obtained results showed expediency and possibility of creation of a common approach to assessment of influence of long-term operation of constructions on flame retardant efficiency of intumescent coatings and considering of this factor in practice of researches and design of fire protection.

Keywords: fire protection; analysis; intumescent coating; flame-retardant coating; exploitation of structures.

REFERENCES

1. Nieman M. B. (ed.). *Stareniye i stabilizatsiya polimerov* [Ageing and stabilization of polymers]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 332 p.
2. Duderov N. G., Smirnov P. V., Paganovskiy Yu. K., Mikhaylova E. D., Molchadskiy O. I., Chilikin M. V. Identifikatsiya veshchestv, materialov i sredstv ognezashchity pered ispytaniyami na pozharnuyu opasnost [Identification of agents, materials and means of fire protection prior to fire hazard tests]. *Materialy Vtorogo mezhdunarodnogo seminara "Pozharovzryvoopasnost veshchestv i vzyvozashchita obyektov"* [Materials of the Second International Seminar "Fire-and-explosion hazard of substances and explosion protection of objects"]. Moscow, 1997.

3. Eremina T. Yu., Krashennnikova M. V., Dmitrieva Yu. N., Semenov D. S. Normiruyemye trebovaniya k kachestvu ognезashchitnykh pokrytiy pri sdache stroitelnykh ob'yektov i primeneniye metodov termicheskogo analiza dlya prognozirovaniya dolgovechnosti pokrytiy [Standardized requirements for quality of flame-retardant coatings during commissioning of construction objects and application of thermal analysis methods for prediction of durability of coatings]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 31–33.
4. *Guidance on the estimation of fire protection quality and type of flame-retardant coatings of objects*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2011. 39 p. (in Russian).
5. *Determination of heat-insulating properties of flame-retardant coatings for metal structures. Methodology*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 1998. 19 p. (in Russian).
6. Zverev V. G., Goldin V. D., Teploukhov A. V. Luchistyy nagrev vspuchivayushchikhsya teplozashchitnykh pokrytiy [Radiation heating of intumescent thermal protection coatings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika — Russian Physics Journal*, 2014, vol. 57, no. 8-2, pp. 142–147.
7. Teploukhov A. V. Otsenka ognезashchitnoy effektivnosti tonkosloynnykh vspuchivayushchikhsya pokrytiy v protsesse dlitelnoy ekspluatatsii posredstvom issledovaniya ikh teplofizicheskikh svoystv [Estimation of fire-protective efficiency of the thin layer intumescent coatings while long-term operation by means of research of their thermalphysic properties]. *Trudy MIT — Proceedings of Moscow Institute of Thermal Technology*, 2011, vol. 11, no. 1, pp. 234–238.
8. Garashchenko A. N., Kulkov A. A., Vasin V. P., Rudakova T. A. Vliyaniye sostava i osobennostey povedeniya vspuchivayushchikhsya ognезashchitnykh pokrytiy na ikh effektivnost [Influence of composition and behavior characteristics of the intumescent flame-retardant coatings on their efficiency]. *Voprosy oboronnoy tekhniki — Enginery Problems*, 2010, vol. 4, no. 15, pp. 33–38.
9. Charles E. Anderson Jr., Donna K. Wauters. A thermodynamic heat transfer model for intumescent systems. *International Journal of Engineering Science*, 1984, vol. 22, issue 7, pp. 881–889. DOI: 10.1016/0020-7225(84)90036-3.
10. Zverev V. G., Golédin V. D., Nesmelov V. V., Tsimbalyuk A. F. Modeling heat and mass transfer in intumescent fire-retardant coatings. *Combustion, Explosion, and Snock Waves*, 1998, vol. 34, issue 2, pp. 198–205. DOI: 10.1007/bf02672821.
11. Griffin G. J. The modeling of heat transfer across intumescent polymer coating. *Journal of Fire Sciences*, 2010, vol. 28, issue 3, pp. 249–277. DOI: 10.1177/0734904109346396.
12. Bartholmai M., Schriever R., Schartel B. Influence of external heat flux and coating thickness on the thermal insulation properties of two different intumescent coatings using cone calorimeter and numerical analysis. *Fire and Materials*, 2003, vol. 27, issue 4, pp. 151–162. DOI: 10.1002/fam.823.
13. Zverev V. G., Teploukhov A. V., Tsimbalyuk A. F. Issledovaniye svoystv i ognезashchitnoy effektivnosti vspuchivayushchikhsya pokrytiy [Investigation of properties and fire protection efficiency of intumescent coatings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika — Russian Physics Journal*, 2014, vol. 57, no. 8-2, pp. 148–153.
14. *Instruction No. 1014–73. Methods of prediction of the polymeric materials service life in products*. Moscow, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials Publ., 1974 (in Russian).
15. *The computational and experimental evaluation of heat-insulating ability and flame-retardant efficiency of SGK-2 compound for metal structures with specified value of reduced thickness of a structure*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2007 (in Russian).

For citation: Teploukhov A. V., Zverev V. G., Garashchenko A. N. Metodika i rezultaty otsenki vliyaniya dlitelnoy ekspluatatsii konstruktsiy na osnovnyye svoystva vspuchivayushchikhsya ognезashchitnykh pokrytiy [Methodology and results of estimation of the influence of structures long-term exploitation on basic properties of the intumescent flame-retardant coatings]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 9–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.9-16.