

УДК 699.812.3

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТОКСИЧНОСТЬ ПРОДУКТОВ ТЕРМОЛИЗА И СПОСОБНОСТЬ К ДЫМООБРАЗОВАНИЮ

Мельдер Егор Владимирович, Злобнов Петр Викторович, Сивенков Андрей Борисович

Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования токсичности продуктов термолиза и дымообразующей способности вспучивающихся огнезащитных покрытий для стальных конструкций при воздействии высоких температур (пожара). Полученные результаты свидетельствуют о том, что огнезащитные покрытия, нанесенные на конструкции, как и пожарная нагрузка, находящаяся в здании или сооружении, могут вносить вклад в общую токсикологическую обстановку на пожаре и дымообразование.

Исследования по оценке динамики выхода токсичных продуктов термолиза, а также по определению коэффициента дымообразования проведены в отношении огнезащитных покрытий, имеющих в своем составе различные по своей химической природе компоненты.

Огневые испытания проведены с использованием экспериментальной установки при воздействии на стальной образец с огнезащитой внешнего радиационного теплового потока различной интенсивности. Анализ интенсивности выхода токсичных продуктов термолиза и дымообразующей способности проведен с позиций взаимосвязи процесса формирования вспученного теплоизолирующего слоя. Рассматриваются стадии химических превращений, при которых происходит активное образование токсичных продуктов термолиза, таких как монооксид углерода, диоксид углерода и цианистый водород.

Изучение дымообразующей способности вспучивающихся покрытий свидетельствует о возможности получения огнезащитных покрытий с различной степенью дымообразования (группы дымообразующей способности Д1—Д3 по ГОСТ 12.1.044-89 п. 4.18) в зависимости от компонентного состава и величины плотности внешнего радиационного теплового потока. Установлено, что значительный вклад в образование токсикантов и дымообразующую способность вносит химическая природа связующего огнезащитного покрытия.

Обращается внимание на необходимость комплексной разработки огнезащитных покрытий с учетом не только стандартных характеристик огнезащиты (вязкость, адгезия к защищаемой подложке, коэффициент вспучивания, огнезащитная эффективность), но и токсичности продуктов термолиза и дымообразования.

Ключевые слова: термолиз, средства огнезащиты, стальные конструкции, огнезащитные вспучивающиеся (интумесцентные) покрытия, вспучивание, пенококс, токсичность продуктов термолиза, дымообразующая способность

THE EFFECT OF THE COMPONENT COMPOSITION OF INTUMESCENT FLAME RETARDANT COATINGS ON THE TOXICITY OF THERMOLYSIS PRODUCTS AND THE ABILITY TO SMOKE**Egor V. Melder, Peter V. Zlobnov, Andrey B. Sivenkov**

SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The article presents the results of a study of the toxicity of thermolysis products and the smoke-forming ability of intumescent flame-retardant coatings for steel structures when exposed to high temperatures (fire). The results obtained indicate that fire-retardant coatings applied to structures, as well as the fire load located in a building or structure, can contribute to the overall toxicological situation in a fire and smoke formation. Studies to assess the dynamics of the yield of toxic thermolysis products, as well as to determine the smoke generation coefficient, have been carried out with respect to flame-retardant coatings that have components of different chemical nature in their composition.

Fire tests were carried out using an experimental installation when exposed to a steel sample with fire protection by an external radiation heat flow of varying intensity. The analysis of the intensity of the release of toxic thermolysis products and the smoke-forming ability was carried out from the standpoint of the relationship of the formation of a swollen insulating layer. The stages of chemical transformations in which the active formation of toxic thermolysis products such as carbon monoxide, carbon dioxide and hydrogen cyanide occurs are considered.

The study of the smoke-forming ability of intumescent coatings indicates the possibility of obtaining flame-retardant coatings with varying degrees of smoke formation (groups of smoke-forming ability D1 ... D3 according to GOST 12.1.044-89 p. 4.18), depending on the component composition and the density of the external radiation heat flux. It has been established that the chemical nature of the binder flame retardant coating makes a significant contribution to the formation of toxicants and smoke-forming ability.

Attention is drawn to the need for a comprehensive development of flame-retardant coatings, taking into account not only the standard characteristics of fire protection (viscosity, adhesion to the protected substrate, swelling coefficient, flame-retardant efficiency), but also the toxicity of thermolysis and smoke formation products.

Keywords: thermolysis, fire protection products, steel structures, flame-retardant bulging (intumescent) coatings, swelling, foaming, toxicity of thermolysis products, smoke-forming ability

Введение

Известно, что более чем в 80 % случаев причиной гибели людей на пожарах является отравление токсичными продуктами горения [1]. Опасным представляется как воздействие отдельных токсикантов

на человека, так и суммарное действие токсичных продуктов горения. Ситуация при пожаре становится для человека чрезвычайно опасной в случае действия токсичных продуктов горения в сочетании с задымленностью путей эвакуации. В дан-

ном аспекте изучение особенностей поведения различных материалов и конструкций, а также их огнезащиты в условиях высокотемпературного воздействия (пожара) является приоритетным при рассмотрении вопросов безопасности людей в зданиях и сооружениях при пожаре [1].

Прогнозирование динамики опасных факторов пожара основано на математическом моделировании. Как известно, математические модели состоят из уравнений, которые отражают всю совокупность процессов, характеризующих пожар. При моделировании учитываются такие свойства пожарной нагрузки, как дымообразующая способность, концентрация выделяющихся токсичных газов, теплота сгорания, линейная скорость пламени и др. Данные параметры приведены в базе данных типовой горючей нагрузки [2], свойственной для того или иного типа здания (помещения). Очевидно, что повышенную опасность для людей в условиях пожара представляют факторы дымообразования и выделения токсичных продуктов горения при термическом разложении материалов, имеющих органическую основу.

Для повышения устойчивости зданий, сооружений, конструкций к действию высоких температур (пожара) широкое применение находят различные средства огнезащиты, среди которых наибольшую популярность имеют вспучивающиеся огнезащитные покрытия. Широкое применение данных покрытий обусловлено рядом таких преимуществ, как: малая толщина и вес покрытия; относительно низкая трудоемкость при монтаже; приемлемые декоративные качества [3].

Огнезащитный механизм вспучивающихся систем основан на создании теплоизолирующего пенококсового слоя, который выступает в роли физического барьера, снижающего интенсивность процесса тепломассообмена [4]. Помимо

этого, вспученный слой препятствует проникновению окислителя к нижележащим защитным слоям покрытия. За счет содержания в рецептурах различных функциональных компонентов, огнезащитный механизм вспучивающихся покрытий также строится на процессах охлаждения, так как в результате термического разложения образуются газообразные продукты (аммиак, пары воды, оксиды углерода и т. д.), которые обеспечивают отвод значительной доли тепловой энергии [3].

Известно, что вспучивающиеся покрытия являются многокомпонентными системами, имеющими в своем составе как органические, так и неорганические компоненты. Традиционно они включают следующие функциональные компоненты: источники углеродного каркаса, газообразователи, связующие, а также различного рода наполнители.

Источники углеродного каркаса участвуют в формировании карбонизированного слоя. Считается, что эффективность действия данных компонентов зависит от числа гидроксильных групп, определяющих скорость дегидратации, и от содержания углерода, который отвечает за массу образующегося карбонизированного субстрата. Известными представителями данной группы являются полигидратные соединения. Кроме этого, во многих рецептурах вспучивающихся систем функционально необходимым является применение фосфорсодержащих неорганических и органических соединений. Данные составляющие повышают термическую устойчивость покрытия, предотвращают процессы тления, повышают адгезию, а также принимают непосредственное участие в формировании вспученного пенококсового слоя [3].

В роли газообразователей широкое применение находят органические амины, амиды (меламин, карбамид, гуанидин).

Указанные компоненты выполняют функции, связанные со вспучиванием покрытия, за счет выделения газообразных продуктов термоллиза. Действие газообразователей проявляется на стадии перехода огнезащитного покрытия из стеклообразного в вязкотекучее состояние под действием повышенной температуры.

Представителями связующих агентов являются вещества, оказывающие пластифицирующее и связывающее физико-химическое действие. Они обеспечивают адгезию покрытия к защищаемой подложке, способствуют длительному сохранению кондиции пеногенных систем, а также некоторые из них являются источниками карбонизированного слоя. Довольно часто в рецептурах интумесцентных систем используются такие связующие, как дисперсии винилацетата, эпоксидные смолы, кремнийорганические лаки, каучуковые смолы, хлорсульфированный полиэтилен и другие, а также их различные комбинации. Помимо ключевых составляющих в интумесцентных покрытиях используются наполнители, являющиеся дополнительными функциональными компонентами. В качестве таких добавок могут быть использованы различные по своей природе вещества, обладающие необходимыми свойствами. Так, например, интеркалированный графит применяется в композициях в качестве расширяющегося (вспучивающегося) при нагревании элемента [4]. Однако после процесса интумесценции вспученный слой графита может быть достаточно рыхлым, что приводит к его уносу с защищаемой поверхности. Для повышения механической прочности пенококса, как правило, используются минеральные наполнители, а также борные соединения. Кроме этого, данные компоненты способны повышать термостойкость системы, препятствуя процессу выгорания и окисления вспученного субстрата. В качестве

вспучивающихся добавок и замедлителей горения могут быть использованы также оксиды металлов. Например, гидроксиды металлов, такие как гидроксиды магния и алюминия, — выполняют функцию депрессантов дыма, а также являются компонентами, подавляющими дымообразование при термоллизе различных материалов на органической основе.

Процесс формирования вспученного пенококсового слоя огнезащитных покрытий, имеющих в своем составе подавляющее количество органических соединений, сопровождается образованием различных летучих продуктов разложения, поступающих в окружающую среду, в том числе токсичных продуктов терморазложения. Очевидно, что проблема разработки и применения огнезащитных покрытий, имеющих в своем составе компоненты различные по своей химической природе, должна рассматриваться с учетом их участия в формировании токсикологической и задымленной среды, опасной для жизни и здоровья человека в случае возникновения пожара.

Материалы и методы

В рамках научных исследований были проведены испытания по определению динамики выделения продуктов термоллиза в результате термического воздействия на стальной образец, покрытый разработанными композициями вспучивающегося типа. Для данных целей использовалась экспериментальная установка для определения пожарной опасности материалов, позволяющая проводить экспериментальные исследования процесса термического разложения различных материалов. Экспериментальная установка ранее была неоднократно апробирована для оценки токсичности продуктов горения различных материалов [5–6].

Процесс термоллиза в камере сгорания инициируется посредством воздействия на исследуемый образец падающего

радиационного теплового потока от электронагревательного элемента. Конструктивно экспериментальная установка выполнена таким образом, что образующиеся вследствие термического разложения продукты термолитического разложения поступают в экспозиционную камеру через переходной рукав из камеры сгорания. Система контроля газовоздушной смеси в экспозиционной камере осуществляется за счет применения газоаналитического оборудования, позволяющего определять концен-

трации оксида углерода, диоксида углерода, цианистого водорода и кислорода. Экспериментальная установка предусматривает постоянное визуальное наблюдение за образцом во время испытаний с помощью смотрового окна в боковой стенке камеры сгорания. В качестве образцов использовались стальные пластины (150×150×1,5 мм) с нанесенными огнезащитными покрытиями толщиной $1,25 \pm 0,05$ мм. Компонентный состав исследуемых огнезащитных покрытий представлен в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики вспучивающихся огнезащитных покрытий, величина плотности внешнего радиационного теплового потока (q)

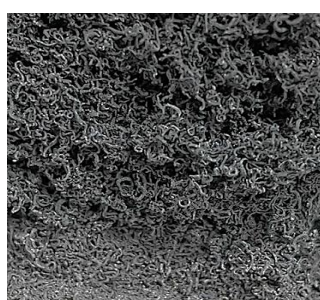
Table 1. Main characteristics of intumescent flame-retardant coatings, the value of the density of the external radiation heat flux (q)

№ образца No of sample	Компонентный состав (рецептура) покрытия Component composition (formulation) of the coating	q , кВт/м ² q , kW/m ²
1	Поливинилацетатная водная дисперсия – 40 %, полифосфат аммония – 14 %, интеркалированный графит – 16 %, полигидратное соединение – 6 %, N-содержащий газообразователь – 4 %, оксиды металлов – 8 %, минеральный наполнитель – 6 %, остальное – вспомогательные компоненты Polyvinyl acetate aqueous dispersion – 40 %, ammonium polyphosphate – 14 %, intercalated graphite – 16 %, polyhydrate compound – 6 %, N-containing gas-forming agent – 4 %, metal oxides – 8 %, mineral filler – 6 %, the rest – auxiliary components	25
2	Компонентный состав аналогичен образцу № 1 The component composition is similar to sample No 1	35
3	Поливинилацетатная водная дисперсия – 40 %, полифосфат аммония – 20 %, N-содержащий газообразователь – 10 %, полигидратное соединение – 10 %, термопластичный полимер – 3 %, минеральное волокно – 4 %, оксиды металлов – 6 %, остальное – вспомогательные компоненты Polyvinyl acetate aqueous dispersion – 40 %, ammonium polyphosphate – 20 %, N-containing gas-forming agent – 10 %, polyhydrate compound – 10 %, thermoplastic polymer – 3 %, mineral fiber – 4 %, metal oxides – 6 %, the rest – auxiliary components	25
4	Компонентный состав аналогичен образцу № 3 The component composition is similar to sample No 3	35

№ образца No of sample	Компонентный состав (рецептура) покрытия Component composition (formulation) of the coating	q , кВт/м ² q , kW/m ²
5	Смола эпоксидно-диановая (ЭД-20) – 14,0 %, отвердитель – 5,0 %, хлорорганический растворитель – 6,0%, пластификатор – 18,0 %, полифосфат аммония – 30,0 %, интеркалированный графит – 7,0 %, минеральное волокно – 2,0 %, оксиды металлов – 3,0 %, гидроксиды металлов – 12,0 %, остальное – вспомогательные компоненты Epoxy-diane resin (ED-20) – 14,0 %, hardener – 5,0 %, organochlorine solvent – 6,0 %, plasticizer – 18,0 %, ammonium polyphosphate – 30,0 %, intercalated graphite – 7,0 %, mineral fiber – 2,0 %, metal oxides – 3,0 %, metal hydroxides – 12,0 %, the rest – auxiliary components	25
6	Компонентный состав аналогичен образцу № 5 The component composition is similar to sample No 5	35

Исследуемые покрытия получены на основе известных подходов к формированию рецептурного состава вспучивающихся покрытий с применением функциональных пеногенных компонентов, а также различных минеральных, ароматических и термопластичных наполнителей. Данные покрытия были подвергнуты огневому испытанию по разработанному методу экспресс-оценки эффективности огнезащитных средств, описанной в работе [7].

Время достижения критической температуры стального образца для всех огнезащитных систем составляло не менее 30 минут в условиях более жестких (на 15–20 %), чем стандартный температурный режим пожара. Вспененные слои данных покрытий отличаются достаточно плотной структурой, без пустот и трещин, а также хорошей адгезией к защищаемой поверхности. На рис. 1 представлена структура вспученных слоев некоторых исследуемых покрытий.



а (a)



б (b)

Рис. 1. Фрагменты структуры вспученных слоев интумесцентных покрытий а – образец № 2; б – образец № 4

Fig. 1. Fragments of the structure of the expanded layers of intumescent coatings a – sample No 2; b – sample No 4

При проведении экспериментальных исследований по оценке динамики выхода продуктов термолитиза в результате

термического воздействия на стальной образец с огнезащитой, рассматривались два режима термического разложения,

при которых величина плотности внешнего радиационного теплового потока соответствовала 25 и 35 кВт/м². Так как объектом исследования являются интумесцентные покрытия, были выбраны такие режимы теплового воздействия, при которых происходит активация процесса вспучивания и формирование вспученного слоя (активное выделение летучих токсичных продуктов термоллиза). В условиях стандартного температурного режима пожара достижение данных значений плотности теплового потока наблюдается на 5–7 минуте от начала огневого испытания.

В работе также была исследована дымообразующая способность вспучивающихся огнезащитных покрытий в соответствии с методом экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов, описанного в ГОСТ 12.1.044-89, п. 4.18. Данный

метод описывает процесс подготовки образцов и процедуру огневых испытаний с описанием требований к измерительному оборудованию. Сущность метода определения коэффициента дымообразования заключается в определении оптической плотности дыма, образующегося при пламенном или беспламенном горении (тлении) известного количества испытуемого вещества или материала, распределенного в заданном объеме. Величина плотности внешнего радиационного теплового потока при огневых испытаниях соответствовала 25 и 35 кВт/м².

Для испытаний были подготовлены стальные пластины (40×40×1,5 мм) с нанесенными огнезащитными покрытиями (табл. 1) толщиной $1,25 \pm 0,05$ мм. На рис. 2 представлены некоторые из исследуемых покрытий после проведенных испытаний.

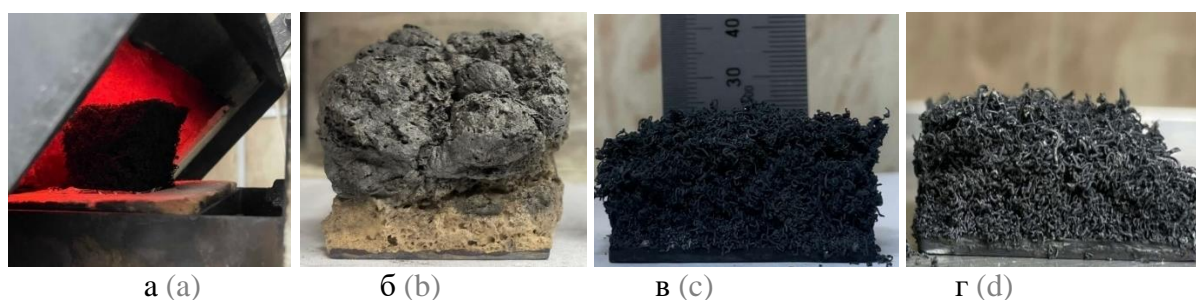


Рис. 2. Вспученные слои исследуемых покрытий в результате термического воздействия теплового потока плотностью 25 кВт/м²: а – образец № 1, $K_{\text{ВСП}} = 40$; б – образец № 3, $K_{\text{ВСП}} = 37$; в – образец №5, $K_{\text{ВСП}} = 20$; г – образец №6, $K_{\text{ВСП}} = 16$

Fig. 2. Swollen layers of the coatings under study as a result of the thermal effect of a heat flux with a density of 25 kW/m² (a – sample № 1, $K_{\text{sw}} = 40$; b – sample № 3, $K_{\text{sw}} = 37$; c – sample № 5, $K_{\text{sw}} = 20$; d – sample № 6, $K_{\text{sw}} = 16$)

Результаты и их обсуждение

В результате высокотемпературного воздействия на интумесцентные покрытия протекают сложные физико-химические процессы, которые приводят к образованию теплоизолирующего пенококсового слоя, формирование которого сопровождается активным поступлением

летучих продуктов в газовую фазу. Характер процесса пенообразования огнезащитного покрытия с выделением различных газообразных продуктов определяется особенностями взаимодействия химических веществ и соединений, входящих в его компонентный состав, при повышении температуры.

Традиционно основу вспучивающихся систем составляют такие компоненты, как полигидратные соединения (полиолы), газообразователи и кислотодonorный агент (полифосфат аммония, соли аммония фосфорной кислоты и т. д.). При термическом воздействии полифосфат аммония выделяет аммиак и воду в две стадии. Первая связана с процессами его плавления при 165–280 °С, а при температуре более 300 °С начинается его интенсивное разложение на аммиак, фосфорную кислоту и пары воды [8].

В ряде работ [3, 9] предполагается, что в результате термических превращений фосфорная кислота участвует в реакции этерификации с полиолом, образуя при этом эфиры. Однако в более современных работах [8, 10] отмеченные результаты не нашли своего подтверждения. В качестве полиола в данных исследованиях использовался пентаэритрит, который, как известно, является устойчивым (кристаллическим) органическим соединением. Для возможности протекания каких-либо химических реакций с участием данного компонента необходимо осуществление процесса его плавления. Анализ кривых дифференциального термического анализа пентаэритрита свидетельствует о начале процесса разрушения его кристаллической фазы при температурах в пределах 195 °С и завершении при 254 °С (оценивается по наличию характерных эндотермических пиков) [8].

В работе [10] с помощью методов термического анализа проводится исследование по изучению особенностей термического превращения вспучивающихся композиций, состоящих из полифосфата аммония, меламин и пентаэритрита в условиях динамического нагрева. Установлено, что для пентаэритрита на начальной стадии (при 195 °С) происходит переход его тетрагональной решетки в кубическую.

Далее осуществляется плавление кубической решетки и параллельное разложение пентаэритрита на формальдегид и ацетальдегид. После этого протекает реакция меламин и ацетальдегида с образованием меламинальдегидных смол. Постоянство образования этих смол поддерживается полифосфатом аммония. Далее происходит разложение ингредиентов, выделяющих аммиак, воду и оксиды углерода. Газообразующие продукты, вспучивая вязкотекучую массу, участвуют в процессе образования термоизолирующего пеногенного слоя.

Рассматривая физико-химические процессы, происходящие при термолитизе вспучивающихся композиций, можно выделить стадию образования газообразных продуктов термолитиза. Каждый из рассмотренных выше компонентов в той или иной степени принимает участие в выделении таких продуктов. Так, например, в ходе проведения исследований летучих продуктов разложения полифосфата аммония [8] было установлено, что при температурах от 165 °С до 280 °С происходит выделение аммиака и воды. Пентаэритрит во вспучивающихся системах выполняет несколько функций [11]. Помимо того, что является источником меламиноальдегидных смол, он еще выделяет газообразные продукты термолитиза (СО, СО₂) при термическом воздействии. Как уже отмечалось выше, рассматриваемые огнезащитные системы должны состоять из пенообразующих компонентов, непосредственная функция которых – вспучивание покрытия. При термическом разложении данных ингредиентов в зависимости от вида и соотношения химических компонентов можно ожидать значительное выделение оксидов углерода. Помимо этого, немалая доля образования угарного газа приходится на термическое разложение уже сформированного вспученного слоя [11].

Как уже отмечалось, существует достаточно большое количество функциональных компонентов для формирования рецептур интумесцентных покрытий. Исходя из накопленного опыта в сфере огнезащиты, сложились известные принципы подбора компонентов и их оптимальных соотношений, которые обеспечивают устойчивое формирование вспученного теплоизолирующего слоя. Так, согласно экспериментальному изучению системы полифосфат аммония — пентаэритрит — карбамид [3] (соотношение 3:1:1) авторы пришли к выводу, что газообразователь в данном случае не вносит значительного вклада в процесс вспенивания системы. Это связано с достаточно низкой температурой деструкции карбамида ($T_{\text{дестр.}} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$) и, как следствие, с более поздним образованием газообразных продуктов при разложении. Для более эффективного процесса вспенивания в интумесцентных системах с карбамидом рекомендуется использовать аммоний фосфорнокислый однозамещенный, температура разложения которого составляет 110–130 $^{\circ}\text{C}$. В некоторых работах [4, 12] было выявлено, что оптимальное соотношение основных компонентов во вспучивающихся си-

стемах составляет 3:1:1 (полифосфат аммония – полигидратное соединение – N-содержащий газообразователь). Однако в отдельных работах встречается также соотношение 2:1:1 [13]. Помимо этого, отмечается, что для снижения температуры коксообразования вспучивающихся систем необходимо увеличить соотношение полифосфат аммония, полигидратное соединение с 3:1 до 4,2:1 [14]. Избыток полифосфата аммония в данном случае способствует термическому разложению углеродсодержащих компонентов при меньших температурах. Учитывая вышесказанное, необходимо акцентировать внимание на то, что на стадии формирования рецептур вспучивающихся систем важнейшим вопросом является не только достижение соответствующей огнезащитной эффективности покрытия, но и оценка выделения токсичных продуктов разложения и дымообразования при термолитическом разложении огнезащитных покрытий.

Анализ результатов проведенных испытаний покрытий на основе поливинилацетатной дисперсии (образцы № 1–4, табл. 1) показывает, что с увеличением потери массы испытываемых покрытий (табл. 2) повышается плотность выделяющегося диоксида углерода.

Таблице 2. Результаты испытаний по оценке токсичности продуктов термолитического разложения покрытий

Table 2. Results of tests to assess the toxicity of coating thermolysis products

№ образца № sample	Исследуемые параметры* Investigated parameters*				
	τ , мин τ , min	ΔM_2 , % ΔM_2 , %	$\Delta \rho$, мг/м ³ $\Delta \rho$, mg/m ³		
			CO ₂	CO	HCN
1	15	8,1	359	29,98	0,7
2	15	8,4	561	80,8	4,95
3	15	12,4	947	2,61	-
4	15	15,1	2459	55,05	2,89
5	15	12,5	330	40	3,4
6	15	32,0	2230	405	40,8

*Примечание: τ – время экспозиции, мин.; ΔM_2 – потеря массы, %; $\Delta \rho$ – плотность выделяющихся газов, мг/м³.

*Note: τ – exposure time, min; ΔM_2 – mass loss, %; $\Delta \rho$ – density of gases released, mg/m³.

Покрытие на водной основе с классическими антипиренами и термопластичным полимером (образцы № 3, 4) характеризуется более интенсивным выделением диоксида углерода (рис. 3, 4) по сравнению с покрытием на водной основе с ана-

логичными антипиренами и интеркалированным графитом (образцы № 1, 2). Однако, при испытании покрытия (образцы № 1, 2) формируется большее количество монооксида углерода СО (рис. 5, 6), а также цианистого водорода HCN (рис. 7, 8).

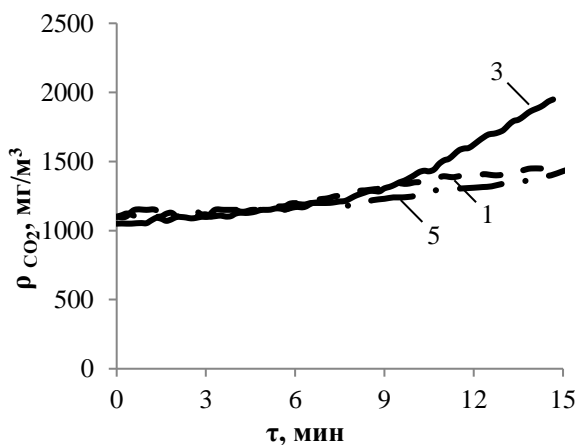


Рис. 3. Зависимость плотности образующегося CO₂ от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 25 кВт/м²

Fig. 3. Dependence of the density of the formed CO₂ on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 25 kW/m²

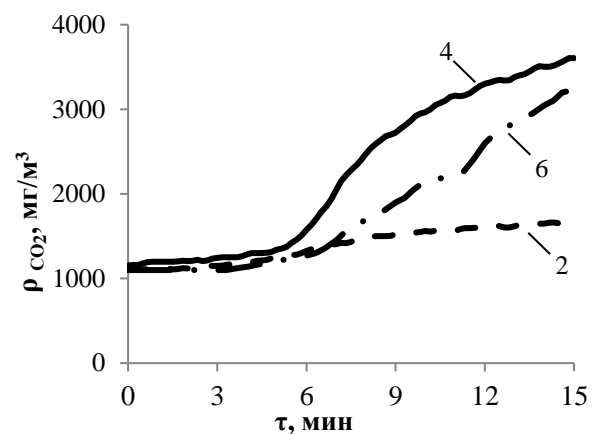


Рис. 4. Зависимость плотности образующегося CO₂ от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м²

Fig. 4. Dependence of the density of the formed CO₂ on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 35 kW/m²

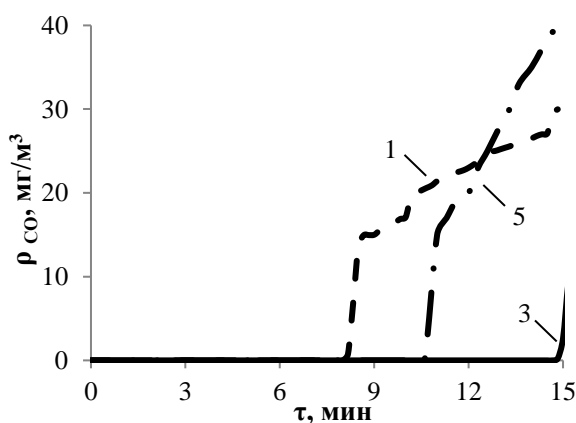


Рис. 5. Зависимость плотности образующегося СО от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 25 кВт/м²

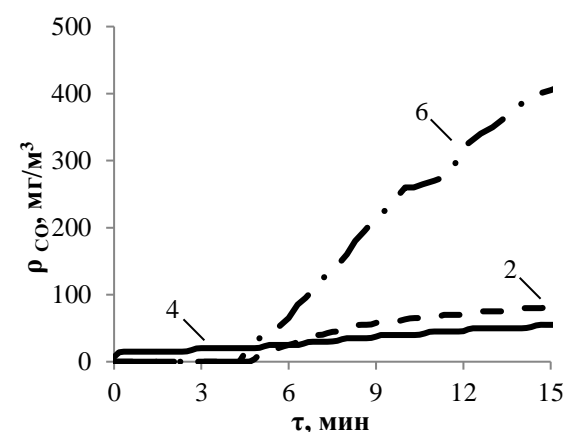


Рис. 6. Зависимость плотности образующегося СО от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м²

Fig. 5. Dependence of the density of the formed CO on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 25 kW/m²

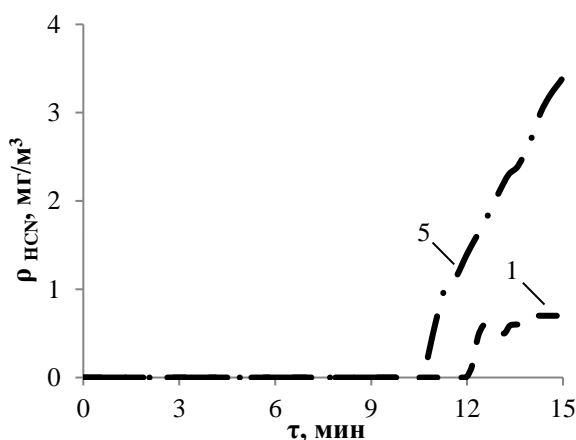


Рис. 7. Зависимость плотности образующегося HCN от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 25 кВт/м²

Fig. 7. Dependence of the density of the formed HCN on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 25 kW/m²

Известно, что циановодород выделяется в результате термолитического разложения азотсодержащих материалов в период формирования вспученного слоя [1]. Анализ кривых зависимости плотности образующегося циановодорода от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м² (рис. 8), показывает, что повышенные значения показателя плотности HCN покрытий № 2 и № 4 приходятся на стадию активации процесса вспучивания. Температура вспучивания данного состава равна 360 °С, тогда как температура вспучивания покрытия № 4 составляет 430 °С. В момент формирования пеногенного субстрата покрытия № 2 (уже на 3–4 минуте) зафиксировано выделение цианистого водорода (рис. 8). Образование HCN при термолитическом разложении покрытия № 4 соответствует 9 минуте экспозиции. При

Fig. 6. Dependence of the density of the formed CO on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 35 kW/m²

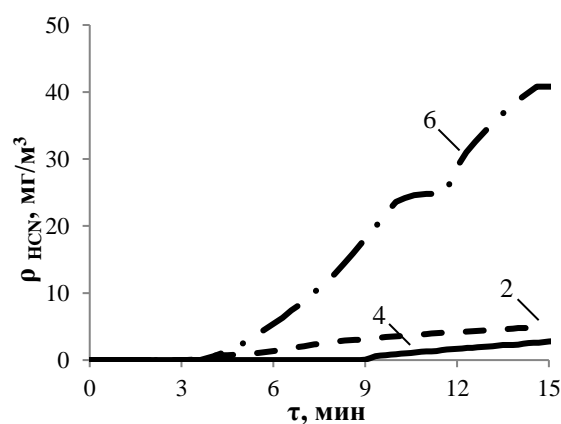


Рис. 8. Зависимость плотности образующегося HCN от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м²

Fig. 7. Dependence of the density of the formed HCN on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 35 kW/m²

анализе дальнейшей динамики выделения цианистого водорода (более 9 минут от начала испытания) наблюдается аналогичный характер кривых №2 и 4, что указывает на сопоставимые скорости выделения данного токсиканта при термолитическом разложении данных покрытий (скорость выделения HCN покрытия № 2 в данном промежутке времени соответствует 0,31 мг/(м³·мин) а скорость выделения HCN покрытия № 4 – 0,45 мг/(м³·мин).

Опираясь на данные, представленные в табл. 1, можно предположить, что повышенный выход углекислого газа в результате термического разложения покрытия на основе классических антипиренов и термопластичного полимера (образец № 3, 4) напрямую связан с повышенным содержанием таких компонентов, как полигидратное соединение и N-содержащий газообразователь [11]. В рецептуре

покрытий 1, 2, при соотношении полифосфат аммония полигидратное соединение – N-содержащий газообразователь (3,5:1,5:1) массовая доля данных компонентов ниже в сравнении с рецептурой покрытия (образцы № 3, 4); соотношение полифосфат аммония – полигидратное соединение – N-содержащий газообразователь составляет 2:1:1). Тогда как повышенный выход угарного газа при термоллизе покрытий № 1, 2 связан с содержанием в рецептуре дополнительного наполнителя – интеркалированного графита, роль которого обусловлена формированием структуры пенококса, а также более ранней активацией процесса вспучивания [12].

Данные предположения основываются на полученных результатах и визуальных наблюдениях в ходе проведения испытаний, которые заключаются в том, что углекислый газ выделяется в процессе формирования вспученного слоя, а угарный газ начинает образовываться

в момент уже сформированного углеродного каркаса, то есть при неполном сгорании углеродсодержащего вещества.

При анализе рис. 9 видно, что пенококсый слой покрытия № 3 начал образовываться уже на заключительной стадии испытания. Зависимость плотности образующегося монооксида углерода от времени экспозиции (рис. 5) также свидетельствует о выделении угарного газа на заключительной стадии испытания в момент начала вспучивания покрытия. Тогда как при испытании покрытия № 1 наблюдается эффект более раннего вспенивания (рис. 10).

Фактический объем выделяющегося монооксида углерода при термическом воздействии плотностью теплового потока 25 кВт/м^2 на покрытие № 1, в сравнении с выходом CO при термоллизе покрытия № 3, увеличился более чем в 10 раз (табл. 2).



Рис. 9. Вспученный слой покрытия № 3 в результате термического воздействия теплового потока плотностью 25 кВт/м^2

Fig. 9. The expanded coating layer No 3 as a result of the thermal effect of a heat flux with a density of 25 kW/m^2



Рис. 10. Вспученный слой покрытия № 1 в результате термического воздействия теплового потока плотностью 25 кВт/м^2 (коэффициент вспучивания – $K_{\text{всп}} = 28$)

Fig. 10. The expanded coating layer No 1 as a result of the thermal effect of a heat flux with a density of 25 kW/m^2 (swelling coefficient – $K_{\text{sw}} = 28$)

В рамках проведенных испытаний было также исследовано покрытие, имеющее в своем составе связующее на основе эпоксидной смолы (образцы № 5, № 6).

Известно, что эпоксидные смолы обладают повышенной пожарной опасностью [15]. Так, при исследовании дымообразующей способности полимерраствора на основе эпоксидной смолы, отвержденного полиэтиленполиамином (ПЭПА), коэффициент дымообразования составлял около $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ [16]. Отмечается, что снижение горючести и дымообразующей способности эпоксидных полимеров достигается путем добавления в компонентный

состав минеральных наполнителей. Кроме того, известно, что на начальных стадиях термолита отвержденных эпоксидных смол происходит разрыв полимерных цепей [15]. При протекании данных реакций наблюдается выделение угарного газа, формальдегида, метана, ацетона и др.

Исследуемая композиция на основе эпоксидной смолы характеризуется меньшей толщиной вспучивания, в сравнении с другими испытываемыми образцами (рис. 11).



Рис. 11. Вспученный слой покрытия № 6 в результате термического воздействия теплового потока плотностью 35 кВт/м^2 ($K_{\text{всп}} = 16$)

Fig. 11. The expanded coating layer No 6 as a result of the thermal effect of a heat flux with a density of 35 kW/m^2 ($K_{\text{sw}} = 16$)

При этом наблюдается значительная потеря массы покрытия – от 12,5 до 32,0 % (табл. 2), которая сопровождается достаточно высокой плотностью выделяющегося монооксида углерода и цианистого водорода в экспозиционной камере (при 25 кВт/м² – 40 и 3,4 мг/м³; при 35 кВт/м² – 405 и 40,8 мг/м³ соответственно). Необходимо отметить, что при замене связующего на основе поливинилацетатной дисперсии на связующее с эпоксидной смолой в несколько раз увеличивается выход СО и HCN (табл. 2, рис. 5–8). Кроме этого, необходимо отметить, что при анализе полученных результатов для огнезащитных покрытий (№ 5, 6) зафиксирована следующая особенность: временной показатель выделения монооксида углерода при термическом воздействии плотностью теплового потока 25 кВт/м² идентичен моменту выделения цианистого водорода. Аналогичная ситуация наблюдается и при тепловом потоке плотностью 35 кВт/м². Это указывает на реализацию совместного (суммарного) эффекта выделения указанных токсичных продуктов термолитиза, что значительно повысит степень токсикологического воздействия на организм человека при пожаре [1].

Представляет интерес сравнительный анализ данных по выходу токсичных продуктов термолитиза и значению массовой скорости выгорания испытуемых образцов огнезащитных покрытий (рис. 12–13). Из результатов, представленных на рис. 12-13 видно, что при повышении плот-

ности теплового потока происходит повышение значений массовой скорости выгорания непосредственно образцов покрытий в 1,5-2 раза, учитывая инертность подложки в виде стального образца. При повышении плотности внешнего теплового потока происходит более ранний процесс вспучивания покрытий, что отражается на выходе токсичных продуктов термолитиза различных покрытий (рис. 3–8). В большинстве случаев просматривается 2-х стадийность процесса потери массы покрытий независимо от природы и соотношений компонентов огнезащитных покрытий. Менее выражена 2-стадийность процесса для огнезащитных покрытий, имеющих в качестве связующего эпоксидную смолу, обусловленная высокими скоростями выгорания данного покрытия с выделением различных токсикантов, особенно при плотности теплового потока 35 кВт/м². Наиболее важным является установление значений массовой скорости выгорания для стадии образования и формирования вспученного слоя покрытия. Во всех случаях характерные максимальные пики массовой скорости выгорания покрытия связаны с началом процесса вспучивания покрытий и выходом токсикантов СО и СО₂. В особенности это связано с покрытиями, имеющими в качестве связующего поливинилацетатную дисперсию. Для покрытий, имеющих в своем составе эпоксидную смолу, заметное повышение массовой скорости выгорания наблюдается в момент выделения цианистого водорода (рис. 7, 8).

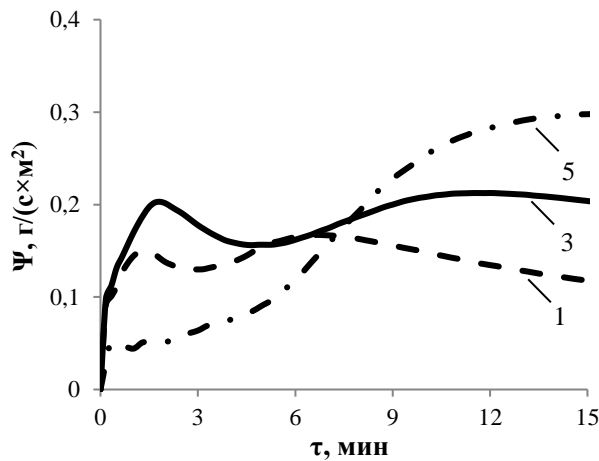


Рис. 12. Зависимость удельной массовой скорости выгорания от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 25 кВт/м²

Fig. 12. Dependence of the specific mass rate of burnout on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 25 kW/m²

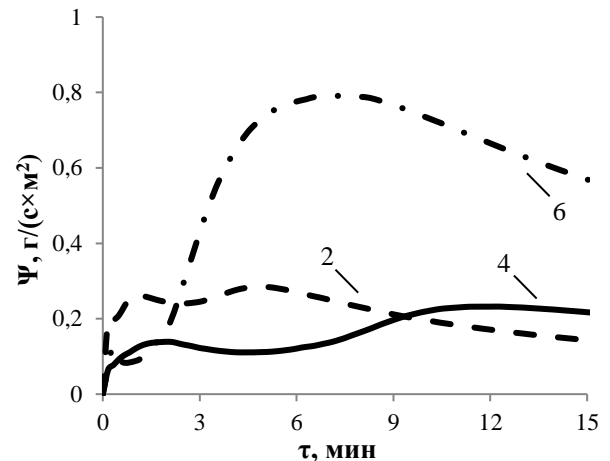


Рис. 13. Зависимость удельной массовой скорости выгорания от времени экспозиции при воздействии теплового потока плотностью 35 кВт/м²

Fig. 13. Dependence of the specific mass rate of burnout on the exposure time when exposed to a heat flux with a density of 35 kW/m²

Полученные зависимости удельной массовой скорости выгорания от времени экспозиции образцов косвенно отражают важнейший показатель скорости тепловыделения в условиях процесса терморазложения покрытий. Для выяснения особенностей процесса терморазложения покрытий с соответствующим компонентным составом с позиций экзо- и эндотермичности протекающих реакций необходимо продолжить исследования с использованием calorиметрических методов и методов термического анализа.

В работе также была исследована дымообразующая способность вспучивающихся огнезащитных покрытий в соответствии с методом экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов. Опираясь на полученные результаты, необходимо отметить, что покрытия, как на основе эпоксидной смолы, так и с использованием поливинилацетатного водного связующего, принимают участие в дымообразовании при их термическом раз-

ложении. Причем некоторые из исследуемых покрытий следует отнести к группе ДЗ (с высокой дымообразующей способностью, табл. 3).

В ходе испытаний был зафиксирован достаточно высокий коэффициент дымообразования образцов покрытий № 5 и 6 (895 и 887 м²/кг соответственно), что объясняется повышенной пожарной опасностью используемого связующего в рецептуре указанных покрытий. Образцы № 1–4, содержащие в своем составе водную поливинилацетатную дисперсию, характеризуются следующими показателями коэффициента дымообразования: при 25 кВт/м² – 33 и 54 м²/кг, а при 35 кВт/м² – 64 и 114 м²/кг. Полученные результаты показывают, что природа химических компонентов, в частности связующих, оказывает непосредственное влияние на дымообразующую способность при термолитизе огнезащитных вспучивающихся систем.

Таблица 3. Результаты испытаний по определению коэффициента дымообразования
Table 3. Test results for determining the smoke generation coefficient

№ образца No of sample	Величина плотности воз- действующего теплового потока, кВт/м ² The value of the density of the impacting heat flow, kW/m ²	Коэффициент дымооб- разования, м ² /кг Smoke generation coefficient, m ² /kg	Группа по дымообразу- ющей способности Smoke-forming capacity group
1	25	54	Д2
2	35	114	Д2
3	25	33	Д1
4	35	65	Д2
5	25	895	Д3
6	35	887	Д3

Заключение

В работе представлены результаты исследований по оценке динамики выхода продуктов термического разложения, а также дымообразующей способности в результате термолиза вспучивающихся огнезащитных систем для стальных строительных конструкций. В составе исследуемых покрытий использовались как традиционные компоненты, так и вспомогательные компоненты, имеющие минеральную, ароматическую и термопластичную природу [12]. На основании данных исследований авторы приходят к выводу, что огнезащитные составы, нанесенные на стальные конструкции объекта, в котором происходит пожар, могут вносить определенный вклад в изменение общей токсикологической картины, а также в дымообразование, что, несомненно, может оказать влияние на безопасность людей при пожаре.

В результате проведенных испытаний было выявлено, что основными источниками дыма, а также токсичных продуктов термолиза в составе вспучивающихся покрытий являются такие группы компонентов, как: связующие, кислотные катализаторы и газообразователи. Исключить

данные элементы из состава интумесцентных покрытий не представляется возможным, так как они являются основными участниками процесса вспенивания покрытий. Представленный анализ результатов испытаний в настоящей работе позволяет сделать важный вывод о том, что путем изменения компонентного состава, массовой доли содержащихся веществ в рецептурах вспучивающихся огнезащитных систем и их соотношений можно достичь снижения рассматриваемых показателей пожарной опасности интумесцентных покрытий с учетом сохранения эффективности покрытия. Так, например, динамика выделения монооксида углерода может регулироваться посредством изменения температуры активации процесса вспучивания интумесцентной композиции. При добавлении в состав вспучивающегося покрытия интеркалированного графита, выступающего в качестве одного из основных вспенивающих агентов, удастся снизить температуру активации процесса вспенивания на 70 °С. При этом наблюдается снижение плотности СО внутри экспозиционной камеры на 55 и 91 % в зависимости от плотности внешнего теплового потока.

Различный выход углекислого газа при термоллизе вспучивающихся покрытий может быть связан с изменением содержания компонентов, участвующих в формировании пенококсового слоя. Так, при уменьшении массовой доли таких составляющих, как полигидратное соединение, N-содержащий газообразователь (на 4–6 %) удалось снизить показатель плотности выделяющегося диоксида углерода внутри экспозиционной камеры фактически в 2,6–4,3 раза в зависимости от величины плотности теплового потока. При этом показатель плотности монооксида углерода возрастает в пределах от 1,5 до 11,5 раз, а синильной кислоты – в 1,7 раз.

Необходимо отметить, что природа связующего оказывает значительное влияние на токсикологическую обстановку и дымообразующую способность при термоллизе вспучивающихся покрытий. Так, при исследовании покрытия, имеющего в своем составе эпоксидную смолу, было зафиксировано фактическое повышение плотности выделяющихся продуктов термоллиза (монооксида углерода, цианистого водорода) в некоторых случаях до 15 раз, при сравнении с продуктами термоллиза покрытий на основе поливинилацетатной дисперсии с фактически идентичным составом наполнителей.

Помимо этого, в результате проведенных испытаний наблюдалось увеличение коэффициента дымообразования.

Группа дымообразующей способности покрытия, содержащего в своем составе эпоксидную смолу, соответствует Д3 (с высокой дымообразующей способностью) вне зависимости от величины плотности внешнего радиационного теплового потока (коэффициент дымообразования при 25 кВт/м² составил 895 м²/кг, а при 35 кВт/м² – 887 м²/кг), тогда как коэффициент дымообразования покрытий на основе дисперсии поливинилацетата на порядок ниже (от 33 м²/кг до 114 м²/кг в зависимости от величины плотности внешнего радиационного теплового потока) и относится к группам Д1 и Д2.

По мнению авторов, необходима комплексная разработка рецептур вспучивающихся огнезащитных систем для стальных конструкций с учетом рекомендаций, приведенных в настоящей работе. Данный подход позволяет снизить показатель плотности выделяющихся продуктов термоллиза в условиях пожара, а также значение коэффициента дымообразования.

В рамках дальнейших научных исследований предлагается оригинальное решение, которое заключается в повышении эффективности огнезащиты и снижения их пожароопасных характеристик не только применением соответствующего компонентного состава в сбалансированном виде, но и путем применения комбинаций огнезащитных вспучивающихся покрытий для стальных конструкций [17].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузач С. В., Доан В. М., Нгуен Т. Д. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении : монография. М, 2017. 130 с.
2. Кошмаров Ю. А., Пузач С. В., Андреев В. В. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М., 2012. 126 с.
3. Халтуринский Н. А., Крупкин В. Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 10. С. 33–36.
4. Зыбина О. А., Варламов А. В., Мнацаканов С. С. Проблемы технологии коксообразующих огнезащитных покрытий : монография. Новосибирск, 2010. 50 с.
5. Болдрушкиев О. Б., Пузач С. В., Косьянова Е. Н. Определение показателя токсичности при воздействии циановодорода на организм человека при пожарах : материалы междунар. научн.-практич. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. С. 178–185.

6. Пузач С. В., Болдрушкиев О. Б., Сулейкин Е. В. Новый подход к определению показателя токсичности при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 2. С. 39–46.
7. Мельдер Е. В., Сивенков А. Б. Синергизм комбинированных интумесцентных систем для огнезащиты стальных конструкций // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология : сб. материалов конф. Энгельс : СГТУ им. Гагарина Ю. А., 2022. С. 36–40.
8. Зыбина О. А. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов: дис. ... докт. техн. наук. СПб., 2015. 260 с.
9. Duquesne S., Le Bras M., Delobel R., Camino G., Gengembre L. X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of the Ammonium Polyphosphate-Polyurethane System used as Fire-Retardant Additive in EVA // Journal of Fire Sciences. 2003. Vol. 21. No. 2. P. 89-115. DOI:10.1177/0734904103021002001
10. Чернова Н. С. Химические превращения и механизм огнезащитного действия вспучивающихся композиций: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. 132 с.
11. Ненахов С. А., Пименова В. П. Физико-химия вспениваемых огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 8. С. 11–58.
12. Ненахов С. А., Пименова В. П., Натейкина Л. И. Влияние наполнителей на структуру пенококса на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. 2009. Т. 18. № 7. С. 51–58.
13. Lucherini, A., Maluk, C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 162. P. 105712. DOI:10.1016/j.jcsr.2019.105712
14. Пути снижения температуры пенообразования в системе полифосфат аммония — пентаэритрит в интумесцентных системах / Т. А. Рудакова и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 3. С. 24–31.
15. Эпоксидные связующие для создания труднгорючих и пожаробезопасных полимерных композиционных материалов / Т. А. Гребенева и др. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 11. С. 14–23.
16. Термостойкость и пожарная опасность эпоксидных полимеррастворов / Ушков В. А. и др. // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 68–71.
17. Мельдер Е. В., Сивенков А. Б. Эффективность комбинации интумесцентных покрытий для огнезащиты стальных конструкций // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 1 (95). С. 49–65.

References

1. Puzach S.V., Doan V.M., Nguyen T.D. Education, distribution and human exposure to toxic combustion products in a fire in a room. Monograph. M.: Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2017. 130 p. (rus).
2. Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Andreev V.V. Forecasting of dangerous factors of fire in the room. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2012; 126. (rus).
3. Khalturinsky N.A., Krupkin V.G. On mechanism of fire retardant intumescent coating formation// Fire and Explosion Safety. 2011; 10: 33–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16972927> (rus).
4. Zyбина O.A., Varlamov A.V., Mnatsakanov S.S. Problems of technology of coke-forming flame-retardant coatings. Monograph, Novosibirsk: SIBPRINT, 2010. 50. (rus).
5. Boldrushkiev O.B., Puzach S.V., Kosyanova Y.N. Determination of the toxicity index when exposed cyanide on the human body during fires. Materials of the X International scientific and practical conference of young scientists and specialists "Problems of technosphere safety - 2021". Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021; 178–185. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46136082> (rus).
6. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B., Suleikin E.V. A new approach to determining the toxicity index under the joint impact of hydrogen cyanide and carbon monoxide during a fire in the room. Fires and emergencies: prevention, elimination. 2021; 2: 39–46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46355472> (rus).
7. Melder E.V., Sivenkov A.B. Relevance of research and development of combinations of intumescent flame retardant coatings. Collection of materials of the IX International Conference "Composite-2022". Engels: THESE (branch) of the Gagarin State Technical University named after Yu.A., 2022; 36–40. (rus).
8. Zyбина O.A. Theoretical principles and technology of flame-retardant swelling materials: dis. ... Dr. Sci. (Eng.): 05.17.06 – St. Petersburg, 2015. (rus).
9. Duquesne S., Le Bras M., Delobel R., Samipo G., Gengembre L. X-ray photoelectron spectroscopy study of the ammonium polyphosphate-polyurethane system used as fire-retardant additive in EVA. Journal of Fire Sciences. 2003; 2: 89–115. DOI:10.1177/0734904103021002001.

10. Chernova N.S. Chemical transformations and the mechanism of flame-retardant action of swelling compositions: dis. ... Cand. Sci. (Eng.): 05.17.06 – St. Petersburg, 2010. (rus).
11. Nenakhov S.A., Pimenova V.P. Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate (review of the literature). Fire and explosion safety. 2010; 8: 11–58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15209813> (rus).
12. Nenakhov S.A., Pimenova V.P., Nateikina L.I. Influence of fillers on the structure of foam coke based on ammonium polyphosphate. Fire and explosion safety. 2009; 7: 51–58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12869649> (rus).
13. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. Journal of Constructional Steel Research. 2019; 162: 105712. DOI:10.1016/j.jcsr.2019.105712.
14. Rudakova T.A., Yevtushenko Yu.M., Grigoriev Yu.A., Batrakov A.A. Ways of reducing the temperature of foaming in the system ammonium polyphosphate - pentaerythritol in intumescent systems. Fire and explosion safety. 2015; 3: 24–31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23491404> (rus).
15. Grebeneva T.A., Chursova L.V., Panina N.N., Orlov A.V., Epoxy binders for creation of flame-retardant and fireproof polymer composite materials // Production and scientific-technical journal "All materials. Encyclopedic reference book". 2022; 14–23. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49794853> (rus).
16. Ushkov V.A., Abramov V.V., Grigorieva L.S., Kiryanova L.V. Heat resistance and fire hazard of epoxy polymer solutions. Building materials. 2011; 12: 68–71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17304868> (rus).
17. Melder E.V., Sivenkov A.B. The effectiveness of the combination of flame-retardant intumescent coatings for steel constructions. Scientific online journal "Technosphere safety technologies". 2022; 1: 49–65. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.49-65. (rus).

Информация об авторах

Мельдер Егор Владимирович, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия ГПС МЧС России, Россия, 129366, г. Москва, улица Бориса Галушкина, д. 4; ORCID 0000-0002-4658-393X; РИНЦ ID 1124775; e-mail: gokamel@yandex.ru

Сивенков Андрей Борисович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве (в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты), Академия ГПС МЧС России, Россия, 129366, г. Москва, улица Бориса Галушкина, д. 4; ORCID 0000-0003-3821-8606; РИНЦ ID: 434522; Scopus Author ID 57204498793; e-mail: sivenkov01@mail.ru

Злобнов Петр Викторович, заместитель начальника учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, начальник научно-исследовательского отдела проблем профилактики объектов защиты, Академия ГПС МЧС России, Россия,

Information about the authors

Egor V. Melder, Adjunct of the Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, SFA of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID 0000-0002-4658-393X; ID RISC 1124775; e-mail: gokamel@yandex.ru

Andrey B. Sivenkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety in Construction (as part of the educational and scientific complex of Fire safety of objects of Protection), SFA of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0003; ID RISC: 434522; Scopus Author ID 57204498793; e-mail: sivenkov01@mail.ru

Peter V. Zlobnov, Deputy Head of the educational and scientific complex of fire safety of objects of protection - Head of the Research Department of problems of prevention of objects of protection, SFA of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St.,

129366, г. Москва, улица Бориса 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID
Галушкина, д. 4; РИНЦ ID: 766876; RISC: 766876; e-mail: zlobnov70@mail.ru
e-mail: zlobnov70@mail.ru