

Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде)

Дмитрий Александрович Корольченко , Татьяна Юрьевна Еремина,
Сергей Викторович Пузач, Федор Александрович Портнов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Стальные конструкции при высокотемпературном воздействии деформируются, теряют устойчивость и несущую способность, в результате чего происходит обрушение конструкций с последующим обрушением здания. Известно, что для увеличения пределов огнестойкости стальных конструкций до R 90 и R 120 часто используют вспучивающиеся краски. Но огнезащитная эффективность вспучивающихся красок при длительной эксплуатации недостаточно изучена, и применение такого вида огнезащитной обработки для несущих стальных конструкций требует обоснования. Для обеспечения устойчивости здания с требуемым пределом огнестойкости конструкций актуальным является изучение технологических факторов, влияющих на огнестойкость стальных конструкций со вспучивающимися красками на водной основе.

Цель работы. Разработка подходов к моделированию номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины на водной основе. Были решены следующие задачи:

- построены блок-схемы исследования для получения фундаментальных взаимосвязей динамики изменения структуры огнезащитного материала при тепловом воздействии на предел огнестойкости строительной конструкции на основе выбора функционального критерия;
- разработаны математические модели зависимости толщины сухого слоя огнезащитных материалов от требуемого предела огнестойкости и теплофизических характеристик огнезащитных материалов на основании экспериментальных исследований свойств и эффективности огнезащитных материалов;
- построены номограммы зависимостей толщины сухого слоя огнезащитных материалов от огнезащитной эффективности огнезащитных материалов на водной основе.

Методы исследования. Для анализа теплофизических характеристик огнезащитных материалов использовали анализатор термических констант Hot Disk TPS 1500. С помощью термического анализа производилось исследование свойств огнезащитных материалов, а также происходящих в них физико-химических преобразований при программированном воздействии температуры и с применением специализированной аппаратуры термического анализа. Изучение эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций проводилось в соответствии с ГОСТ Р 53295–2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности».

Результаты и их обсуждение. В результате исследований был разработан подход к прогнозированию огнестойкости строительных конструкций в виде построения блок-схемы исследования, на основании которой производится выбор функциональных критерий. На основе получения экспериментальных исследований возможно построение математических зависимостей огнестойкости от показателей, которые являются функциональными критериями. В частности, при оценке огнестойкости стальных конструкций проводится прогнозирование на основе теплофизических показателей. В работе впервые предложено введение функции огнезащитного материала в стандартный расчет огнестойкости при решении статической и теплофизической задач. На основе полученных данных приведены уравнения зависимости толщины сухого слоя огнезащитного материала от требуемого предела огнестойкости конструкции и номограмма прогрева защищенных стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины.

Выходы. По итогам проведенных исследований получены фундаментальные взаимосвязи динамики изменения структуры огнезащитного материала при тепловом воздействии на предел огнестойкости строительной конструкции на основе выбора функционального критерия. На основании экспериментальных исследований свойств и эффективности огнезащитных материалов разработана математическая модель зависимости толщины сухого слоя огнезащитных материалов от требуемого предела огнестойкости и теплофизических характеристик огнезащитных материалов.

Ключевые слова: огнестойкость строительных конструкций; расчет предела огнестойкости; математическое моделирование; несущая способность; средства огнезащиты

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Теоретическая и экспериментальная разработка новых композиционных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенной и биогенной угроз» #FSWG-2020-0007)

Для цитирования: Корольченко Д.А., Еремина Т.Ю., Пузач С.В., Портнов Ф.А. Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде) // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 30–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.30-46

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Simulation of nomograms showing the heating of steel structures with flame retardant coatings of different thicknesses (in the water)

Dmitriy A. Korolchenko ✉, Tatyana Yu. Eremina, Sergey V. Puzach, Fedor A. Portnov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. High temperatures cause deformation of steel structures which also lose stability and the bearing capacity, resulting in the collapse of structures with the subsequent collapse of the building. It is understood that intumescent paints are often used to increase the fire-resistance limits of steel structures up to R 90 and R 120. However the fire protection effectiveness of intumescent paints has not been sufficiently studied for the case of the long-term operation, and the application of this type of fire protection treatment of bearing steel structures requires justification. To ensure the building stability, coupled with the required fire resistance limit of structures, one should study the engineering factors affecting the fire resistance of steel structures that have intumescent paint coatings.

Purpose of the research work. Development of approaches to simulation of nomograms demonstrating the heating of steel structures with flame retardant coatings of different thicknesses. The research work solved the following tasks:

- block diagrams of the research undertaking were developed to find the fundamental relationships between the dynamics of change in the structure of fire protection materials under thermal effects and the fire resistance limit of a building structure based on the choice of the functional criterion;
- mathematical models demonstrating dependence between the thickness of the dry layer of fire-retardant material were developed; the required fire resistance limit and thermo-physical characteristics of fire-resistant materials based on the experimental studies of the properties and effectiveness of fire-resistant materials were identified;
- nomograms showing dependences between the thickness of the dry layer of flame retardant materials and the flame retardant efficiency of flame retardants were made.

Research methods. Hot Disk TPS 1500 thermal constant analyzer was used to analyze the thermo-physical characteristics of flame retardant materials. Thermal analysis was used to study the properties of flame retardants, as well as physical and chemical transformations occurring inside them under the programmed exposure to temperature effects and with the use of specialized thermal analysis equipment. The study of the fire protection efficiency for steel structures was conducted in accordance with GOST R (Russian State Standard) 53295–2009 “Fire protection means for steel structures. General requirements. The method of fire protection efficiency determination”.

Results and their discussion. As a result of the research, an approach to prediction of the fire resistance of building structures was developed in the form of a research flowchart, used to choose the functional criteria. Experimental studies were conducted to identify mathematical dependences between the fire resistance and the indicators, which serve as functional criteria. In particular, when assessing the fire resistance of steel structures, a prediction is made on the basis of thermos-physical indicators. The authors were first to propose the introduction of the function of fire protection materials into the standard pattern of fire resistance analysis in the course of solving static and thermo-physical problems. The obtained data were used to make equations of dependence between the thickness of a dry layer of a fire-retardant material, the required fire-resistance limit of a structure, and the nomogram showing the heating of protected steel structures with fire-retardant coatings of various thicknesses.

Conclusions. The results of the studies allowed identifying fundamental relationships between the dynamics of change in the structure of fire-retardant materials under the thermal effect and the fire resistance limit of a building structure on the basis of the choice of a functional criterion. Experimental studies of the properties and effectiveness of fire-resistant materials were conducted to develop a mathematical model showing dependence between the thickness of the dry layer of fire-resistant materials, the required fire-resistance limit and thermal-physical characteristics of fire-resistant materials.

Keywords: fire resistance of building structures; analysis of the fire resistance limit; mathematical modelling; bearing capacity; fire protection materials

Acknowledgments: this work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project «Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety during the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats» #FSWG-2020-0007)

For citation: Korolchenko D.A., Eremina T.Yu., Puzach S.V., Portnov F.A. Simulation of nomograms showing the heating of steel structures with flame retardant coatings of different thicknesses (in the water). Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety. 2022; 31(6):30-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.30-46

✉ Dmitriy Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Введение

Стальные конструкции при высокотемпературном воздействии деформируются, теряют устойчивость и несущую способность, в результате чего происходит обрушение конструкций с последующим обрушением здания [1, 2].

Поведение защищенных стальных конструкций зависит от теплофизических характеристик сухого слоя огнезащитных покрытий: λ (теплопроводность), ρ (плотность), C_p (теплоемкость) с учетом высокотемпературного воздействия [3].

Известно, что начало обрушения несущих стальных конструкций может происходить через 10–15 мин после начала пожара в стандартном режиме. Предотвращение обрушения возможно с увеличением предела огнестойкости конструкций и здания в целом за счет нанесения огнезащитных покрытий на металлические конструкции. В настоящее время рынок огнезащитных материалов для стальных конструкций достаточно обширен и каждый из продуктов в данной области должен быть подвергнут подтверждению огнезащитных свойств [4].

В.И. Голованов пишет, что оценка огнестойкости строительных конструкций производится двумя способами: испытанием и расчетом, с учетом температурного режима стандартного пожара, который характеризуется следующей зависимостью:

$$T - T_0 = 345 \lg(8\tau + 1),$$

где T — среднеобъемная температура, соответствующая времени t , °C;

T_0 — температура до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °C;

τ — время, исчисляемое от начала огневого воздействия, мин.

Эффективность огнезащитных средств для стальных конструкций определяется временем нагрева двутавровой колонны, без приложения статической нагрузки на образец, до усредненной критической температуры стали 500 °C. Затем с учетом времени прогрева стали огнезащитное покрытие относится к соответствующей группе огнезащитной эффективности.

Определение предела огнестойкости расчетным методом основывается на результатах огневых испытаний аналогичных конструкций с учетом толщины покрытия, теплотехнических и высокотемпературных

характеристик огнезащитных покрытий (λ (теплопроводность), ρ (плотность), C_p (теплоемкость)).

Толщина огнезащитного покрытия — один из основных показателей, влияющих на прогрев стальных конструкций.

При высокотемпературном воздействии коэффициент температуропроводности огнезащитных покрытий изменяется в зависимости от их состава и температуры:

$$\alpha = \frac{\lambda_t}{c_t \rho_0}, \text{ м}^2/\text{с},$$

где λ_t — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град);

c_t — теплоемкость, Дж/(кг·град);

ρ_0 — плотность, кг/м³.

Огнезащитные вспучивающиеся краски при нагревании выделяют парообразные вещества и образуют на защищаемой поверхности тонкий непрозрачный слой, который вспучивается при определенной температуре, и толщина его увеличивается в 50–100 раз. Вспучивающиеся краски на водной и органической основе наносят на поверхность стальных конструкций слоем толщиной до 3 мм. При температуре 170–220 °C покрытие вспучивается с образованием пористого термоизоляционного слоя. Пористый слой с низкой теплопроводностью предотвращает быстрый нагрев защищаемых конструкций.

Известно, что для увеличения пределов огнестойкости стальных конструкций до R 90 и R 120 часто используют вспучивающиеся краски. Но огнезащитная эффективность вспучивающихся красок при длительной эксплуатации недостаточно изучена, и применение такого вида огнезащитной обработки для несущих стальных конструкций требует обоснования.

Для обеспечения устойчивости здания с требуемым пределом огнестойкости конструкций не более R 30 актуальным является изучение технологических факторов, влияющих на огнестойкость стальных конструкций со вспучивающимися красками на водной основе [5, 6].

Цель работы — разработка подходов к моделированию номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины на водной основе.

Задачи:

1. Построение блок-схемы исследования для получения фундаментальных взаимосвязей динамики изменения структуры огнезащитного материала при тепловом воздействии на предел огнестой-

кости строительной конструкции на основе выбора функционального критерия.

2. Проведение экспериментальных исследований для определения теплофизических характеристик (теплоемкости, теплопроводности), эксплуатационных характеристик (плотность, кратность вспучивания) огнезащитного покрытия на водной основе.

3. Разработка математической модели зависимости толщины сухого слоя огнезащитных материалов от требуемого предела огнестойкости и теплофизических характеристик огнезащитных материалов на основании экспериментальных исследований свойств и эффективности огнезащитных материалов.

4. Построение номограмм зависимостей толщины сухого слоя огнезащитных материалов от огнезащитной эффективности огнезащитных материалов на водной основе.

Теоретическая часть

Исходной фундаментальной зависимостью для решения задачи прогнозирования эффективности средств огнезащиты для строительных материалов и конструкций является подход к расчетной оценке пределов огнестойкости, основанный на решении статической и теплотехнической задачи [7, 8] (рис. 1 и 2).

Огнезащитные вспучивающие материалы в зависимости от типа связующего, наполнителей и добавок имеют большое разнообразие [9–12]. Для того чтобы учесть большое разнообразие средств огнезащиты для металлических конструкций, принято решение — в качестве функциональных критериев не использовать параметры, учитывающие компонентный химический состав огнезащитных материалов. Оптимальным вариантом является использование в даль-

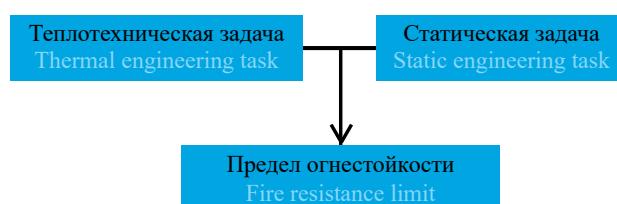


Рис. 1. Оценка предела огнестойкости расчетным методом
Fig. 1. Using the method of analysis to evaluate the fire resistance limit

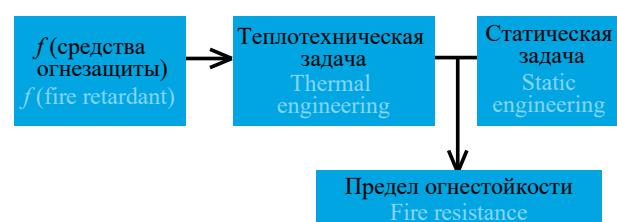


Рис. 2. Оценка предела огнестойкости с использованием функции средства огнезащиты
Fig. 2. Using the fire retardant function to evaluate the fire resistance limit

нейшей работе теплотехнических характеристик: теплоемкости, теплопроводности, тепловых эффектов химических реакций. Кроме того, необходимо учесть и структурные характеристики: плотность и кратность вспучивания огнезащитных материалов [13].

Авторами предложена блок-схема для исследования средств огнезащиты для металлических конструкций (рис. 3).

Кроме параметров, учитывающих поведение огнезащитных материалов в условиях высокотемпературных воздействий, следует также учитывать эксплуатационные характеристики, определяемые

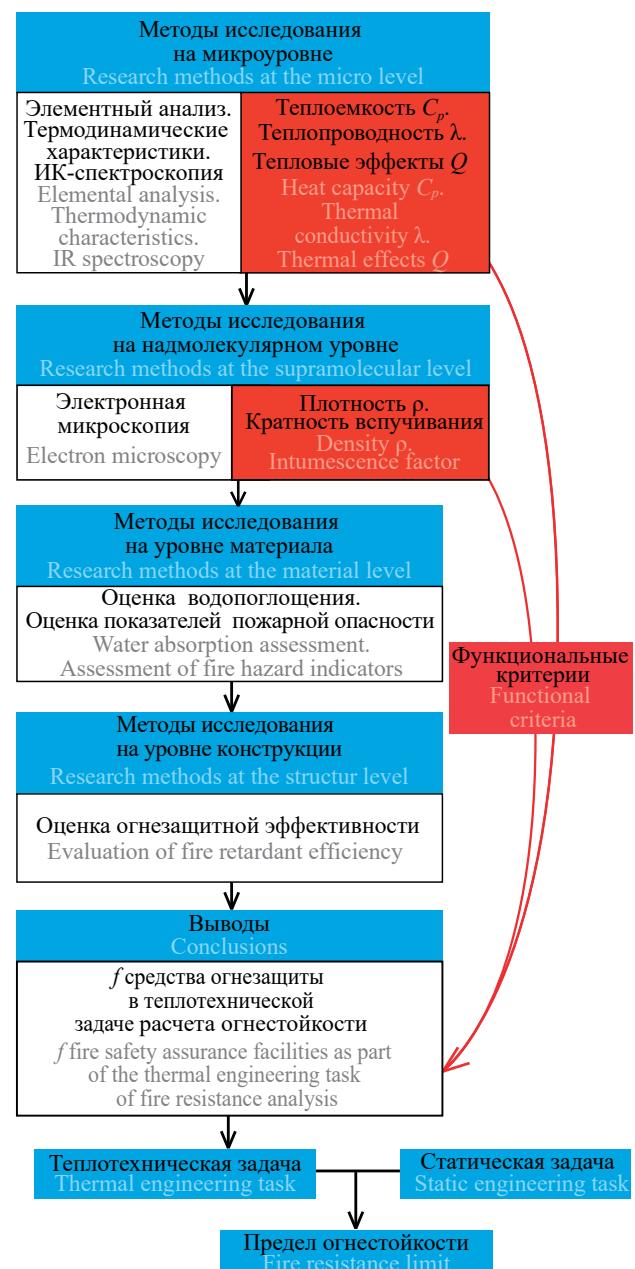


Рис. 3. Блок-схема для исследования параметров средств огнезащиты для металлических конструкций и материалов
Fig. 3. The block diagram for the study of fire safety parameters for metal structures and materials

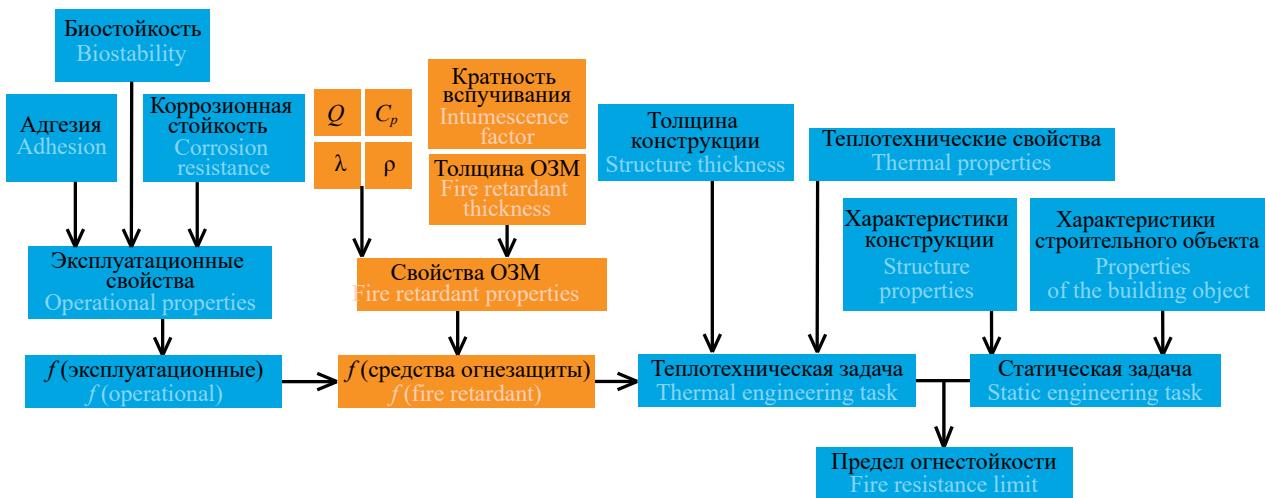
**Рис. 4.** Блок-схема выбора для металлических конструкций с применением функции средства огнезащиты

Fig. 4. Choice-making block diagram for metal structures using the function of the fire safety assurance facility

устойчивостью средств огнезащиты к механическим воздействиям, коррозии, а также к длительным воздействиям окружающей среды (долговечностью). Кроме этих характеристик большой актуальностью пользуются также параметры, связанные с эксплуатацией средств огнезащиты в различных климатических условиях, а также для различных видов поверхностей, что также может быть проработано [14–24] (рис. 4).

Построенный алгоритм предлагает прогнозировать поведение огнезащитных материалов с использованием их теплотехнических характеристик в условиях воздействия высоких температур.

Методы исследования

Анализ теплофизических характеристик

Анализаторы термических констант Hot Disk TPS 1500, «Hot Disk AB», диапазон определения теплопроводности в нестационарном режиме 0,01–400 Вт/(м·К), температуропроводности 0,01–100 мм²/с удельной объемной теплоемкости вплоть до 5 МДж/(м³·К), погрешность определения

**Рис. 5.** Анализатор термических констант Hot Disk TPS 1500
Fig. 5. Hot Disk TPS 1500 thermal constant analyzer

теплопроводности ± 5 % (сертификат о калибровке № 5130 м до 01.08.2021) (рис. 5) взаимодействует с плоским сенсором (рис. 6), который состоит из электропроводящей двойной спирали, выполненной из тонкой никелевой фольги. Эта спираль зажата между двумя тонкими листами изолирующего материала (каптон или слюда в зависимости от температуры измерения).

В процессе эксперимента плоский сенсор помещают между двумя одинаковыми образцами так, чтобы сенсор касался их поверхностей. Сенсор является как источником тепла, так и динамическим термометром. Это достигается за счет того, что по спирали сенсора пропускается электрический ток, которого

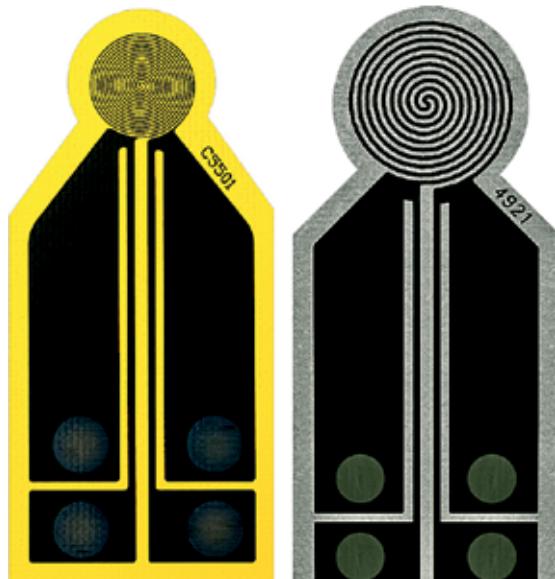
**Рис. 6.** Плоский сенсор Hot Disk: материал изоляции каптон (слева) и слюда (справа)

Fig. 6. Hot Disk flat sensor: captone insulation material (left) and mica (right)

достаточно, чтобы повысить температуру сенсора от долей до нескольких градусов, при этом одновременно фиксируется увеличение температуры как функция от времени. Вследствие увеличения температуры сопротивление сенсора меняется, что сопровождается перепадом напряжения. Прибор фиксирует изменения в напряжении и силе тока в течение определенного промежутка времени и точно рассчитывает тепловой поток между сенсором и исследуемым образцом.

Для измерения увеличения сопротивления сенсора используется электрический мост. Через этот сбалансированный мост при помощи чувствительного вольтметра определяется увеличение сопротивления сенсора в процессе считывания дисбаланса в напряжении.

Термический анализ (ТА)

Представляет собой совокупность методов, с помощью которых производится исследование свойств веществ и материалов, а также происходящие в них физико-химические преобразования при программируированном воздействии температуры

и с применением специализированной аппаратуры термического анализа [25–29] (рис. 7).

В работе использовался метод термогравиметрии для оценки потери массы образца в процессе терморазложения, метод дифференциального термометрии для установления величины тепловых эффектов химических реакций в процессе термодеструкции. На основании полученных результатов также устанавливались величины температуры, при которой происходило вслучивание огнезащитных материалов.

Огневые испытания

Исследование эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций проводилось в соответствии с ГОСТ Р 53295–2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности».

В качестве испытательного оборудования использовалась малогабаритная печь, предназначенная для исследования огнезащитной эффективности средств огнезащиты, нанесенных на образцы — колонны двутаврового сечения (рис. 8).

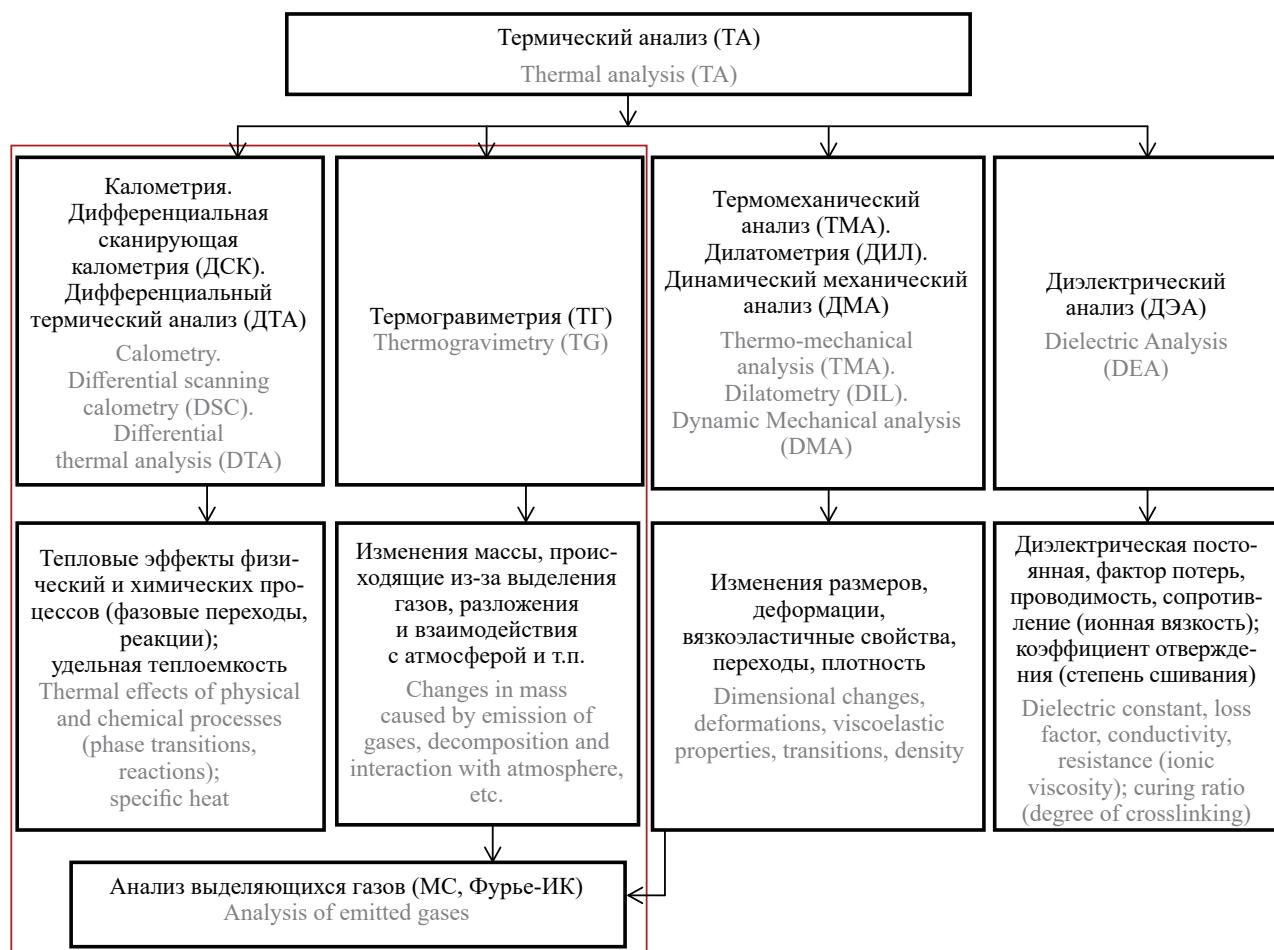


Рис. 7. Методы термического анализа (ТА)

Fig. 7. Thermal analysis (TA) methods

**Рис. 8. Малогабаритная печь**

Fig. 8. Small-size furnace

В процессе проведения испытаний регистрировались следующие показатели:

- время наступления предельного состояния образца (достижение критической температуры);
- за предельное состояние принято достижение стальной поверхности образца критической температуры в 500 °C в среднем в контрольных точках образца;
- поведение огнезащитного состава (вспучивание, обугливание, отслоение, появление трещин, выделение дыма, продуктов горения и т.д.).

Метод оценки кратности вспучивания

Коэффициент вспучивания огнезащитных покрытий определялся по методике оценки огнезащитных свойств покрытий в зависимости от сроков их эксплуатации, разработанной ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Образец покрытия размером 200 × 200 мм помещают в термошкаф при температуре 600 °C и выдерживают в течение 5 мин для получения вспученного слоя. Коэффициент вспучивания K_{bc} определяется как отношение толщины вспученного слоя h к исходной толщине покрытия h_0 :

$$K_{bc} = h/h_0. \quad (1)$$

Измерение h и h_0 проводится в сечениях пяти образцов. Коэффициент вспучивания определяется как среднеарифметическое пяти измерений.

Образцы для испытаний

Для проведения экспериментального исследования поведения вспучивающихся составов в усло-

Таблица 1. Перечень используемых образцов

Table 1. List of specimens used

Образец № Specimen No.	Краткая характеристика Brief description
1	Огнезащитный состав на водной основе с отвердителем Water based fire retardant composition with hardener
2	Огнезащитный состав на водной основе Water based fire retardant composition
3	Огнезащитный состав на водной основе Water based fire retardant composition

виях огневого воздействия были использованы составы, отличающиеся связующими компонентами, отвердителями и т.п., приведенные в табл. 1.

Результаты испытаний

Результаты экспериментальных исследований в соответствии с заявленным планом приведены в табл. 2–5 и на рис. 6–20.

Фото огневых испытаний образцов приведены на рис. 9–14.

Графики результатов термического анализа образцов 15–17 приведены на рис. 15–17.

Обсуждение результатов

Огнезащитные вспучивающиеся краски при нагревании выделяют парообразные вещества

Таблица 2. Характеристики и эффективность огнезащитных материалов для стальных конструкций

Table 2. Characteristics and effectiveness of fire retardant materials for steel structures

Образец № Specimen No.	Толщина защитного слоя, мм Thickness of the protective layer, mm	Кратность вспучивания, раз Intumescence factor, times	Температура начала вспучивания, °C Intumescence triggering temperature, °C	Время достижения предельного состояния, мин Time to the limit state, min
1	6,3	50	268	45 (ПТМ 5,8) 45 (PTM 5.8)
2	2	16	220	30 (ПТМ 5,8) 30 (PTM 5.8)
3	2	17	230	15 (ПТМ 3,4) 15 (PTM 3.4)

Таблица 3. Термофизические характеристики огнезащитных материалов для стальных конструкций до терморазложения
Table 3. Thermo-physical characteristics of flame retardant materials for steel structures before thermal decomposition

Образец № Specimen No.	Образец до терморазложения (20 °C) Specimen before thermal decomposition (20 °C)				
	Плотность до терморазложения, кг/м ³ Density before thermal decomposition, kg/m ³	Тепловая мощность, мВт Thermal power, mW	Удельная объемная теплоемкость, МДж/(м ³ ·К) Specific heat capacity, MJ/(m ³ ·K)	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	Удельная объемная теплоемкость, МДж/(м ³ ·К) Specific heat capacity, MJ/(m ³ ·K)
1	716	40	0,954	0,202	0,212
2	1395	20	1,875	0,385	0,205
3	1385	20	2,384	0,444	0,186

Таблица 4. Термофизические характеристики огнезащитных материалов для стальных конструкций при температуре 200 °C

Table 4. Thermo-physical characteristics of flame retardant materials for steel structures at 200 °C

Образец № Specimen No.	Образец при 200 °C Specimen at 200 °C				
	Плотность при 200 градусах, кг/м ³ Density at 200 degrees, kg/m ³	Тепловая мощность, мВт Thermal power, mW	Удельная объемная теплоемкость, МДж/(м ³ ·К) Specific heat capacity, MJ/(m ³ ·K)	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	Температуропроводность, мм ² /с Temperature conductivity, mm ² /s
1	689	40	0,99	0,14	0,144
2	988	40	1,52	0,29	0,195
3	592	40	2,32	0,31	0,134

и образуют на защищаемой поверхности тонкий непрозрачный слой, который всучивается при определенной температуре, и толщина его увеличивается в 50–100 раз. Вспучивающиеся краски на водной и органической основе наносят на поверхность стальных конструкций слоем толщиной до 3 мм. При температуре 170–220 °C покрытие всучивается с образованием пористого термоизоляционного слоя. Пористый слой с низкой теплопроводно-

Таблица 5. Термофизические характеристики огнезащитных материалов для стальных конструкций после терморазложения
Table 5. Thermo-physical characteristics of flame retardant materials for steel structures after thermal decomposition

Образец № Specimen No.	Образец при 700 °C Specimen at 700 °C				
	Плотность при 700 градусах, кг/м ³ Density at 700 degrees, kg/m ³	Тепловая мощность, мВт Thermal power, mW	Удельная объемная теплоемкость, МДж/(м ³ ·К) Specific heat capacity, MJ/(m ³ ·K)	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	Температуропроводность, мм ² /с Temperature conductivity, mm ² /s
1	82	80	0,109	0,123	1,130
2	92	80	0,227	0,066	0,291
3	75	80	0,412	0,212	0,284

стью предотвращает быстрый нагрев защищаемых конструкций [30, 31].

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы: для образца 1 и образца 2 характерны ярко выраженные экзотермические эффекты в начале теплового воздействия, что характеризует активные термо-



Рис. 9. Образец 1 до испытаний

Fig. 9. Specimen 1 before testing



Рис. 10. Образец 1 после испытаний

Fig. 10. Specimen 1 after testing



Рис. 12. Образец 2 после испытаний

Fig. 12. Specimen 2 after testing



Рис. 11. Образец 2 до испытаний

Fig. 11. Specimen 2 before testing

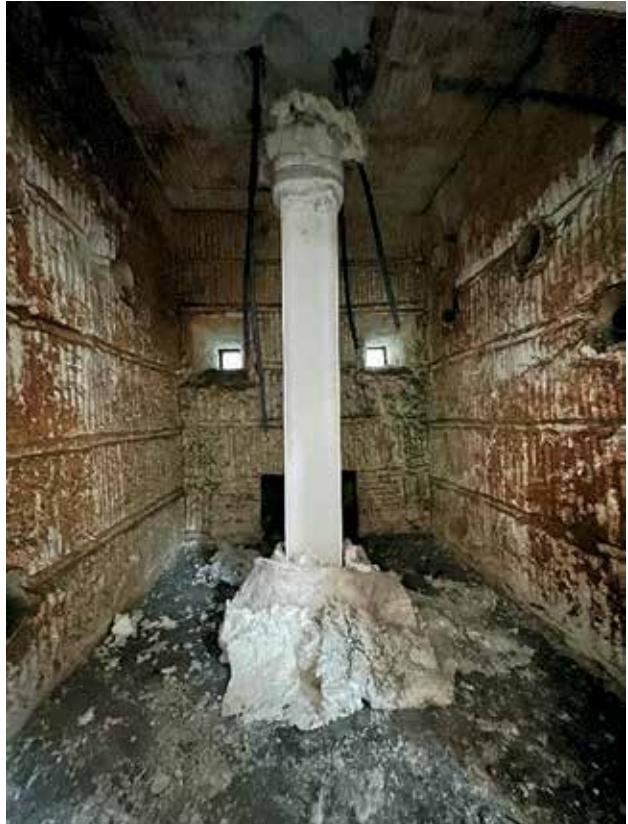


Рис. 13. Образец 3 до испытаний

Fig. 13. Specimen 3 before testing



Рис. 14. Образец 3 после испытаний

Fig. 14. Specimen 3 after testing

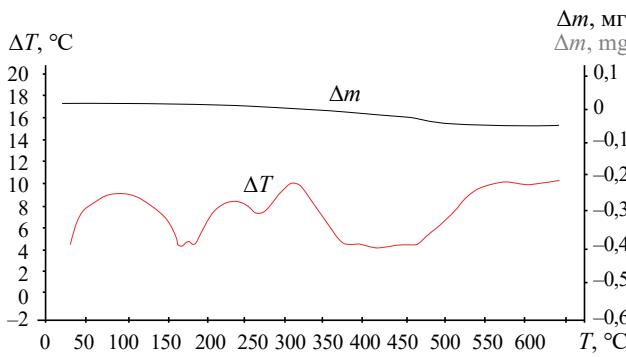


Рис. 15. Термический анализ образца 1

Fig. 15. Thermal analysis of Specimen 1

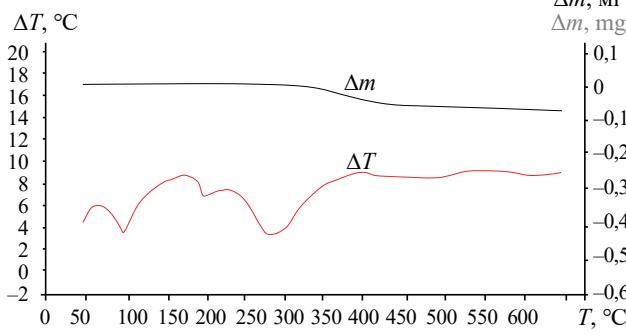


Рис. 16. Термический анализ образца 2

Fig. 16. Thermal analysis of Specimen 2

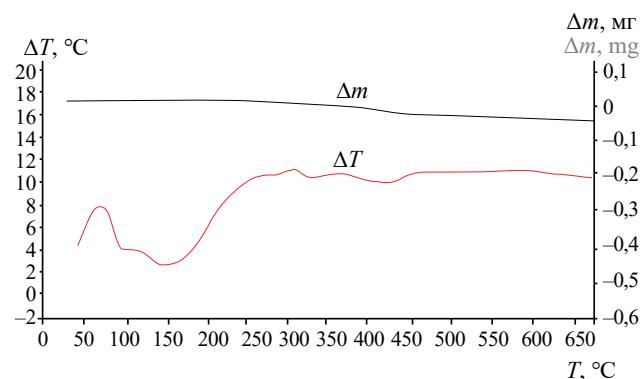


Рис. 17. Термический анализ образца 3

Fig. 17. Thermal analysis of Specimen 3

окислительные процессы, которые приводят к образованию неустойчивой структуры. При этом для образца 3 характерно наличие меньшего количества выделяемого тепла на начальном этапе, при этом наблюдаются эндотермические эффекты, определяющие устойчивость структуры вспученного слоя, а также охлаждение поверхности. В табл. 6 приведено детальное описание результатов термического анализа.

Поведение составов в процессе эксперимента различается, но в интервалах 35–100 °C происходит размягчение, разогрев, термоокислительный процесс; в интервалах 100–185 °C — экзотермические эффекты; в интервалах 185–255 °C — эндотермические эффекты, от 255 °C — стабилизация. Поэтому для математического моделирования можно рекомендовать данные интервалы.

Исследуемыми теплофизическими характеристиками в рамках оценки поведения огнезащитных материалов являются: λ (коэффициент теплопроводности), ρ (плотность), C_p (теплоемкость) с учетом высокотемпературного воздействия. На основании полученных результатов можно заключить, что наиболее стабильный с точки зрения поверхностной структуры состав (образец 1) имеет наименьшую температуропроводность при сравнительно схожих с другими составами значениях теплоемкости.

Таблица 6. Тепловые эффекты реакции терморазложения
Table 6. Thermal effects of the thermal decomposition reaction

Образец № Specimen No.	Temperатурный интервал, °C Temperature range, °C			
	20–100	100–200	200–300	300–400
	Тепловой эффект химической реакции Q , Дж Heat effect of the chemical reaction Q , J			
1	8,5	-7,3	8,5	40,5
2	9,3	4,2	12,7	15,3
3	12,34	6,71	18,2	8,2

Эти результаты коррелируются с полученными ранее данными (ДТА и предел огнестойкости). Кроме того, данный образец обладает наибольшей кратностью вспучивания, что при устойчивой структуре обеспечивает наибольшую огнестойкость (не менее 35 мин). Полученные результаты используются для математического моделирования огнезащитных материалов, обладающих заданными эксплуатационными свойствами.

Математическое моделирование

В результате экспериментальных исследований проведена аппроксимация данных на основании математического моделирования. Для определения распределения температур внутри стальной конструкции и слоя огнезащиты решается нестационарное одномерное уравнение теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2)$$

где ρ — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c — удельная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

T — температура, К;

λ — коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

τ — время, с;

y — координата, направленная по толщине стальной конструкции и слоя (сухого или вспученного) огнезащитного материала, м.

Уравнение (1) решается численным методом контрольных объемов.

Используется неявная конечно-разностная схема и метод продольной прогонки.

Величина предела огнестойкости выражается в качестве показателя времени ($\delta\tau$), когда температура стальной конструкции достигнет критического значения 500°C .

Предполагаем идеальный тепловой контакт между слоями стальной конструкции и огнезащитного состава, что является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева стальной конструкции. Впервые применен подобный подход с использованием теплотехнических параметров огнезащитных материалов для стальных конструкций.

Значение толщины сухого слоя огнезащитного материала по оси y сначала задается постоянным в зависимости от приведенной толщины металла. При достижении температурой огнезащитного материала величины начала вспучивания вышеуказанный шаг изменяется в области вспученного слоя. Величина шага по времени определяется из числа Куранта.

Приведенная математическая задача впервые решалась методом компьютерного моделирования.

Таблица 7. Уравнения номограмм требуемой толщины сухого слоя в зависимости от предела огнестойкости

Table 7. Equations of nomograms of the required thickness of the dry layer depending on the fire resistance limit

Образец № Specimen No.	Уравнение зависимости толщины сухого слоя огнезащитного материала от требуемого предела огнестойкости конструкции Equation showing dependence between the thickness of the dry layer of the fireproofing material and the required fire resistance limit of the structure
1	$\delta_c = -4 \cdot 10^{-4} R^2 + 0,1737R + 0,4752$ $\delta_d = -4 \cdot 10^{-4} R^2 + 0,1737R + 0,4752$
2	$\delta_c = -10^{-4} R^2 + 0,0534R + 0,4368$ $\delta_d = -10^{-4} R^2 + 0,0534R + 0,4368$
3	$\delta_c = -2 \cdot 10^{-4} R^2 + 0,0975R + 0,6956$ $\delta_d = -2 \cdot 10^{-4} R^2 + 0,0975R + 0,6956$

Была написана компьютерная программа на языке программирования ФОРТРАН.

В результате численных экспериментов для трех огнезащитных покрытий с различной толщиной сухого слоя δ_c , являющейся координатой y из уравнения теплопроводности (1), были получены зависимости температуры стальной конструкции от времени с начала испытаний при разных пределах огнестойкости. Вышеуказанные зависимости позволили получить зависимости толщины сухого слоя огнезащитных составов от требуемого предела огнестойкости R . При аппроксимации данных решений уравнения теплопроводности получены уравнения номограмм, представленные в табл. 7.

Номограмма прогрева защищенных стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины

Определение теплотехнических и высокотемпературных характеристик огнезащитных вспучивающихся красок для стальных конструкций связано с построением номограмм прогрева защищенных стальных конструкций с огнезащитными вспучивающимися красками различной толщины в зависимости от приведенной толщины металла.

На основании математического моделирования получены номограммы зависимостей толщины сухого слоя от требуемого предела огнестойкости при заданных теплофизических характеристиках исследуемых составов (рис. 18–23).

На основании математического моделирования получены для трех огнезащитных покрытий зависимости температуры стальной конструкции от времени с начала испытаний при разных пределах огнестойкости, а также номограммы зави-

смостей толщины сухого слоя огнезащитных составов от требуемого предела огнестойкости (рис. 18–23).

Достоверность расчетного метода подтверждается сопоставлением результатов расчета температур стальной конструкции с ее экспериментальными значениями (рис. 19, 25–28). Погрешность расчета не превышала 2 %.

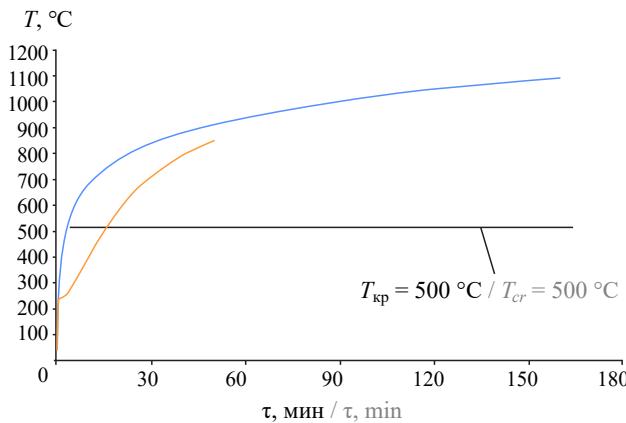


Рис. 18. Зависимости температур от времени: Краска Терма, стальная конструкция с приведенной толщиной 3,4 мм. Огнезащитная эффективность 15 мин

Fig. 18. Temperature-time dependencies: Terma paint, steel construction with a thickness of 3.4 mm. Fire safety efficiency of 15 min

ется сопоставлением результатов расчета температур стальной конструкции с ее экспериментальными значениями (рис. 19, 25–28). Погрешность расчета не превышала 2 %.

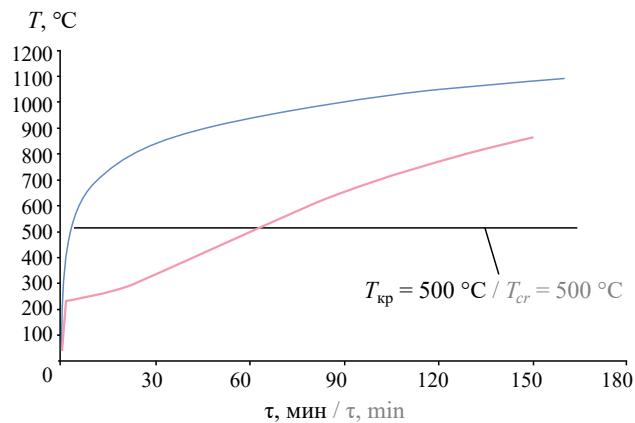


Рис. 21. Огнезащитная эффективность 60 мин

Fig. 21. Fire safety efficiency of 60 min

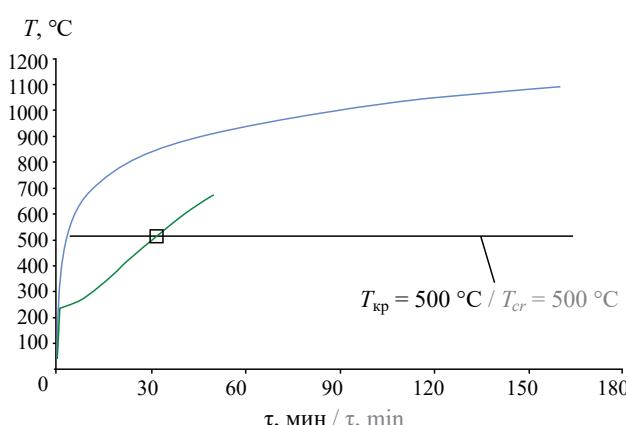


Рис. 19. Огнезащитная эффективность 30 мин

Fig. 19. Fire safety efficiency of 30 min

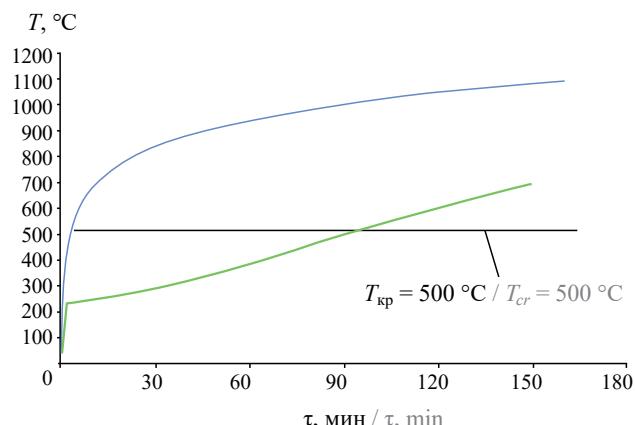


Рис. 22. Огнезащитная эффективность 90 мин

Fig. 22. Fire safety efficiency of 90 min

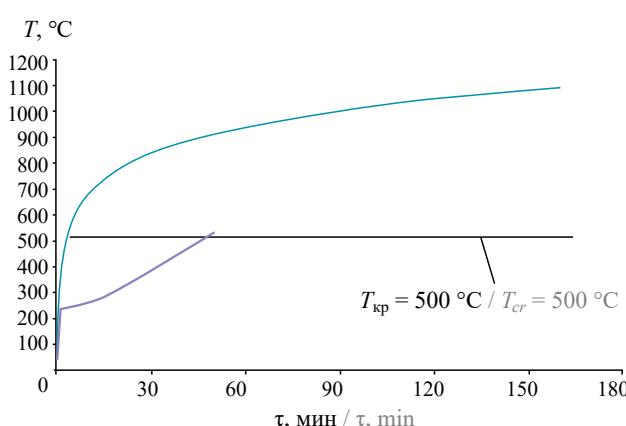


Рис. 20. Огнезащитная эффективность 45 мин

Fig. 20. Fire safety efficiency of 45 min

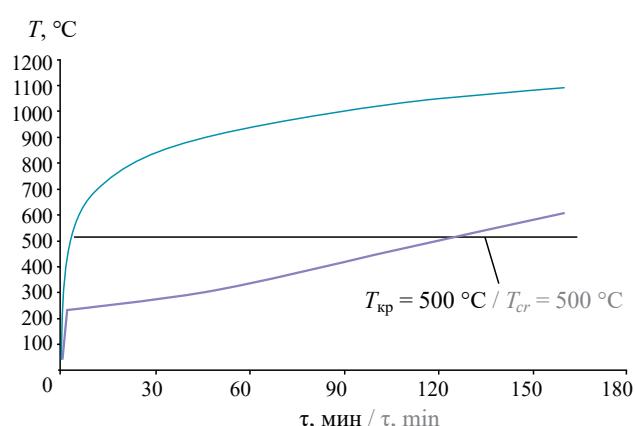


Рис. 23. Огнезащитная эффективность 120 мин

Fig. 23. Fire safety efficiency of 120 min

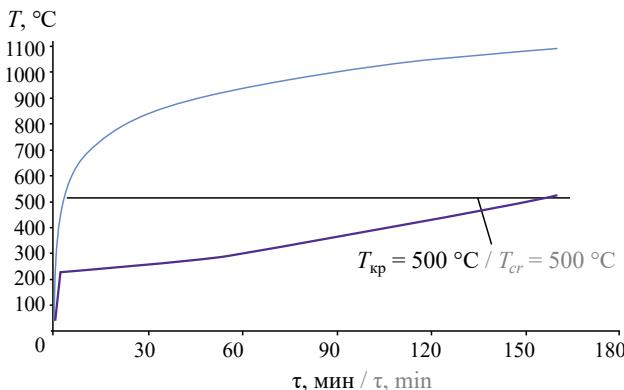


Рис. 24. Огнезащитная эффективность 150 мин

Fig. 24. Fire safety efficiency of 150 min

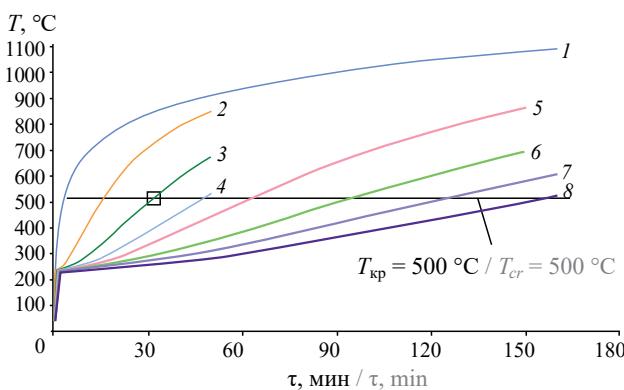


Рис. 25. Зависимости температур от времени с начала пожара:
1 — температура «стандартного» пожара; температура стальной конструкции с приведенной толщиной 3,4 мм, обработанной огнезащитным составом Терма, при огнезащитной эффективности, расчет: 2 — 15 мин; 3 — 30; 4 — 45; 5 — 60; 6 — 90; 7 — 120; 8 — 150; эксперимент: □ — 30 мин

Fig. 25. Dependences between temperatures and the time from the beginning of the fire: 1 — “standard” fire temperature; the temperature of the steel structure with a given thickness of 3.4 mm, treated with a fire retardant composition of Terma, for the following cases of the fire safety efficiency, calculation: 2 — 15 min; 3 — 30; 4 — 45; 5 — 60; 6 — 90; 7 — 120; 8 — 150; experiment: □ — 30 min

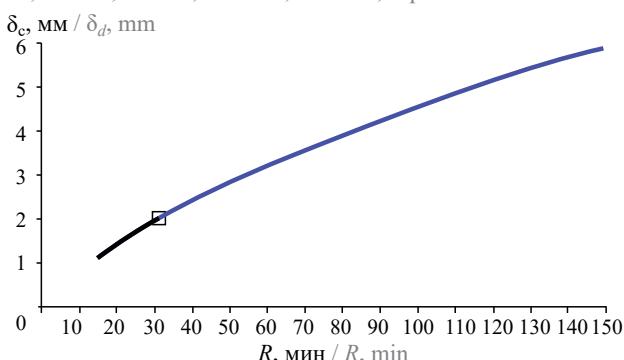


Рис. 26. Зависимость толщины сухого слоя огнезащитного состава Терма, нанесенного на стальную конструкцию с приведенной толщиной 3,4 мм, от огнезащитной эффективности, расчет: $\delta_c = -10^{-4}R^2 + 0,0534R + 0,4368$, достоверность аппроксимации 0,9991, где δ_c — толщина сухого слоя, мм; R — огнезащитная эффективность, мин; □ — эксперимент ($R = 30$ мин)

Fig. 26. Dependence between the thickness of the dry layer of Terma flame retardant composition, applied to the steel structure with a reduced thickness of 3.4 mm, and the fire safety efficiency: calculation: $\delta_d = -10^{-4}R^2 + 0.0534R + 0.4368$, reliability of approximation 0.9991; where δ_d is the dry layer thickness, mm; R is the fire safety efficiency, min; □ — experiment ($R = 30$ min)

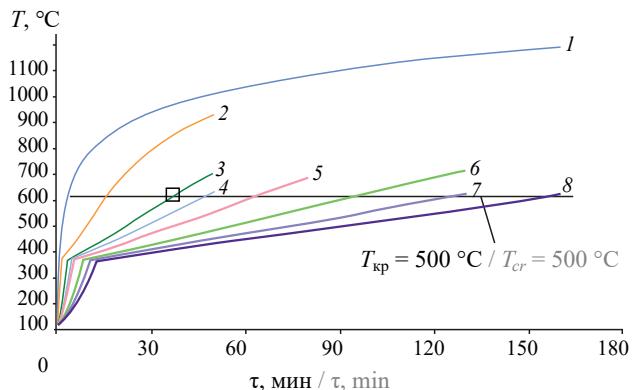


Рис. 27. Зависимости температур от времени с начала пожара:

1 — температура «стандартного» пожара; температура стальной конструкции с приведенной толщиной 3,4 мм, обработанной огнезащитным составом на водной основе с отвердителем, при огнезащитной эффективности, расчет: 2 — 15 мин; 3 — 35; 4 — 45; 5 — 60; 6 — 90; 7 — 120; 8 — 150; эксперимент: □ — 35 мин

Fig. 27. Dependences between temperatures and the time from the beginning of the fire: 1 — “standard” fire temperature; the temperature of the steel structure with a given thickness of 3.4 mm, treated with a water-based flame retardant composition with a hardener to ensure the fire safety efficiency: calculation: 2 — 15 min; 3 — 35; 4 — 45; 5 — 60; 6 — 90; 7 — 120; 8 — 150; experiment: □ — 35 min

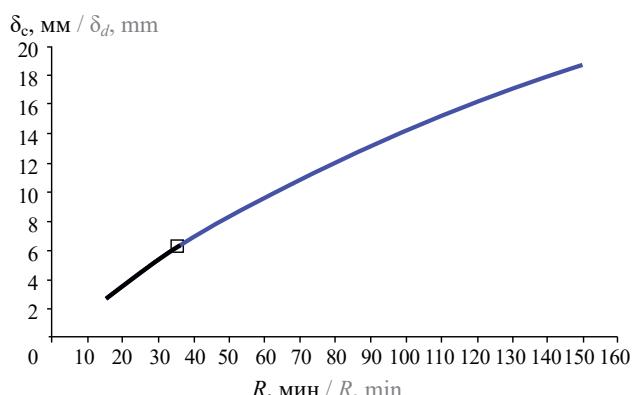


Рис. 28. Зависимость толщины сухого слоя огнезащитного состава на водной основе с отвердителем, нанесенным на стальную конструкцию с приведенной толщиной 3,4 мм, от огнезащитной эффективности: расчет: $\delta_c = -4 \cdot 10^{-4}R^2 + 0,1737R + 0,4752$, достоверность аппроксимации 0,9992; где δ_c — толщина сухого слоя, мм; R — огнезащитная эффективность, мин; □ — эксперимент ($R = 35$ мин)

Fig. 28. Dependence between the thickness of the dry layer of a water-based fire retardant composition with a hardener, applied to a steel structure with a given thickness of 3.4 mm and the fire safety efficiency analysis: $\delta_d = -4 \cdot 10^{-4}R^2 + 0.1737R + 0.4752$, reliability of approximation is 0.9992; where δ_d is dry layer thickness, mm; R is the fire safety efficiency, min; □ — experiment ($R = 35$ min)

Выводы

1. По итогам проведенных исследований впервые получены фундаментальные взаимосвязи динамики изменения структуры огнезащитного материала при тепловом воздействии на предел огнестойкости строительной конструкции на основе выбора функционального критерия.

2. С учетом зависимости теплофизических характеристик (теплоемкости, теплопроводности) от структуры (плотность, кратность вспучивания) и температуры огнезащитного покрытия полимерных композиционных материалов (огнезащитных материалов на основе полимерного связующего) разработан новый подход с внедрением «функции огнезащитного материала».

3. На основании экспериментальных исследований свойств и эффективности огнезащитных материалов разработана математическая модель зависимости толщины сухого слоя огнезащитных материалов от требуемого предела огнестойкости

и теплофизических характеристик огнезащитных материалов, а также приведены nomограммы зависимостей толщины сухого слоя огнезащитных материалов от огнезащитной эффективности полимерных композиционных материалов функционального назначения (огнезащитных материалов).

4. Полученные результаты в дальнейшем позволяют прогнозировать эффективность огнезащитных материалов исходя из заданных параметров (функциональных критериев). Новый подобный метод позволит решить теплотехническую задачу для оценки пределов огнестойкости различных типов строительных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теличенко В.И., Ройтман В.М. Обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара — базовый элемент системы комплексной безопасности // Повышение безопасности зданий и сооружений в процессе строительства и эксплуатации : мат. 1-го Национального конгресса «Комплексная безопасность в строительстве 2010», 18–21 мая 2010 г., Москва, ВВЦ. Вып. 9. М., 2010. С. 15–29.
2. Ройтман В.М., Приступюк Д.Н. Особенности оценки стойкости зданий и сооружений из железобетонных конструкций при комбинированных особых воздействиях с участием пожара // Пожаро-взрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 7. С. 29–38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15188713>
3. Wang Y., Goransson U., Holmstedt G., Omrane A. A model for prediction of temperature in steel structure protected by intumescent coating, based on tests in the cone calorimeter // Fire Safety Science. 2005. Vol. 8. Pp. 235–246. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-235
4. CMD (Construction Market Data). The market for fire protection of steel frames total market (beams and columns) by Types of Fire Protection, Great Britain, 2001–2014. URL: http://www.cmdgroup.com_February_2015
5. Голованов В.И., Кузнецова Е.В. Эффективные средства огнезащиты для стальных и железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 82–90. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24229215>
6. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // Пожарная безопасность. 2020. № 4. С. 43–54. DOI: 10.37657/vnipro.pb.2020.101.4.004
7. Ушанов В.В., Фадеев В.Е., Харитонов В.С., Щелкунов В.И., Павловский А.В., Косачев А.А. Огнестойкость и пожарная опасность сэндвич-панелей и предложения по внесению изменений в нормативные правовые акты по пожарной безопасности в части их применения в зданиях и сооруже-
- ниях различного функционального назначения // Пожарная безопасность. 2016. № 4. С. 119–122. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27521504>
8. Фадеев В.Е. Совершенствование современных методов испытаний на огнестойкость на основе внедрения гармонизированных европейских стандартов // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXVIII Междунар. науч.-практ. конф. М. : ВНИИПО, 2016. Ч. 1. С. 305–309. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817893>
9. Шаталин С.С., Варламов А.В., Зыбина О.А., Мнацаканов С.С. О связующих в огнезащитных вспучивающихся композициях // Дизайн. Материалы. Технология. 2014. № 4 (34). С. 37–40.
10. Завьялов Д.Е., Зыбина О.А., Митрофанов В.В., Мнацаканов С.С. Сравнительное изучение поведения фосфатов аммония в огнезащитных вспучивающихся композициях // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85. Вып. 1. С. 157–159. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43912070>
11. Завьялов Д.Е., Нечаев К.В., Зыбина О.А., Бабкин О.Э., Мнацаканов С.С. Реакции в огнезащитных вспучивающихся красках в присутствии углеродных нанотел // Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. № 10. С. 38–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20274080>
12. Завьялов Д.Е., Зыбина О.А., Мнацаканов С.С., Чернова Н.С., Варламов А.С. Огнезащитные вспучивающиеся композиции на основе интеркалированного графита // Химическая промышленность. 2009. Т. 86. № 8. С. 414–417.
13. Gillet M., Autrique L., Perez L. Mathematical model for intumescent coatings growth: application to fire retardant systems evaluation // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40. Issue 3. Pp. 883–899. DOI: 10.1088/0022-3727/40/3/030
14. Бабкин О.Э., Зыбина О.А., Танклевский Л.Т., Мнацаканов С.С. Диагностика качества нанесения и эффективности коксообразующих огнезащитных покрытий для металлоконструкций // Промышленные покрытия. 2014. № 7–8. С. 50–54.

15. Зыбина О.А., Бабкин О.Э., Танклевский Л.Т., Мнатацанов С.С. Формирование интумесцентного слоя при термоловизе органофосфатаммонийных огнезащитных покрытий // Мир гальваники. 2014. № 5. С. 56–58.
16. Yuan J. Intumescent coating performance on steel structures under realistic fire conditions : Doctor of Philosophy thesis, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, 2009.
17. Dowling J. Fire protection costs for structural steel-work. New Steel Construction. UK, 2003.
18. Sorathia U., Gracik T., Ness J., Durkin A., Williams F., Hunstad M., Berry F. Evaluation of intumescent coatings for shipboard fire protection // Journal of Fire Sciences. 2003. Vol. 21. Issue 6. Pp. 423–450. DOI: 10.1177/0734904103035393
19. Perez L., Autrique L., Pechoux F. Modelling and experimental testing of intumescent coatings under high thermal flux for military applications // Fire Safety Science. 2014.
20. Roberts T., Shirvill L., Waterton W., Buckland I. Fire resistance of passive fire protection coatings after long-term weathering // Process Safety and Environmental Protection. 2010. Vol. 88. Issue 1. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.psep.2009.09.003
21. Kandola B.S., Akonda M.H., Horrocks A.R. Use of high-performance fibres and intumescents as char promoters in glassreinforced polyester composites // Polymer Degradation and Stability. 2005. Vol. 88. Issue 1. Pp. 123–129. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.01.030
22. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Characterization of the performance of an intumescent fire protective coating // Surface and Coating Technology. 2006. Vol. 201. Issue 3–4. Pp. 979–987. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.01.026
23. Andersen J. Experimental study of the thermal resistance of intumescent coatings exposed to different heating rates : Master of Science thesis, Civil Engineering Department, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 2015.
24. Li G.Q., Lou G.B., Zhang C., Wang L., Wang Y. Assess the fire resistance of intumescent coatings by equivalent constant thermal resistance // Fire Technology. 2012. Vol. 48. Issue 2. Pp. 529–546. DOI: 10.1007/s10694-011-0243-8
25. Omrane A., Wang Y.C., Goransson U., Holmstedt G., Alden M. Intumescent coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence // Fire Safety Journal. Vol. 42. Issue 1. Pp. 68–74. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.08.006
26. Bartholomai 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 // Journal of Fire Materials. 2003. Vol. 27. Pp. 151–162.
27. Zhang Y., Wang Y., Bailey C.G., Taylor A.P. Global modelling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions // Fire Safety Journal. 2012. Vol. 50. Pp. 51–62. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.02.004
28. Зыбина О.А., Варламов А.В., Чернова Н.С., Мнатацанов С.С. О роли и превращениях компонентов огнезащитных вспучивающихся лакокрасочных композиций в процессе термоловиза // Журнал прикладной химии. 2009. Вып. 82. № 4. С. 1445–1449. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44519592>
29. Wang L., Dong Y., Zhang D., Zhang C. Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves // Fire Technology. 2015. Vol. 51. Issue 3. Pp. 627–643. DOI: 10.1007/s10694-015-0460-7
30. Головина Е.В. Методика оценки термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для объектов нефтегазовой отрасли : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019. 130 с.
31. Оценка огнезащитных свойств покрытий в зависимости от сроков их эксплуатации : методика. М. : ВНИИПО, 2014. 31 с.

REFERENCES

1. Telichenko V.I., Roitman V.M. Ensuring the resilience of buildings and structures under combined special impacts including fire: the basic element of the system of integrated safety. *Rising the safety of buildings and structures during construction and operation : materials Proceedings of the 1st National Congress "Integrated safety in construction 2010", May 18–21, 2010, Moscow, All-Russia Exhibition Center*. Issue 9. Moscow, 2010; 15–29. (rus).
2. Roitman V.M., Prystupuk D.N. Features of the estimation of buildings and constructions resistance from reinforced concrete designs at the combined hazardous effects with fire participation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(7):29–38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15188713> (rus).
3. Wang Y., Goransson U., Holmstedt G., Omrane A. A model for prediction of temperature in steel structure protected by intumescent coating, based on tests in the cone calorimeter. *Fire Safety Science*. 2005; 8:235–246. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-235
4. CMD (Construction Market Data). The market for fire protection of steel frames total market (beams and columns) by types of fire protection, Great Britain, years 2001–2014. 2015. URL: <http://www.cmdgroup.com>
5. Golovanov V.I., Kuznetsova E.V. Effective means of fire protection for steel and concrete structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 9:82–90. (rus).

6. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Evaluation of fire-retardant effectiveness of coatings for steel structures. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2020; 4:43-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004 (rus).
7. Ushanov V.V., Fadeev V.E., Kharitonov V.S., Shchelkunov V.I., Pavlovsky A.V., Kosachev A.A. Fire resistance and fire hazard of sandwich panels and the proposals on amendments to the normative legal acts on fire safety regarding their application in buildings and structures of various functionality. *Pozharnaya Bezopasnost'/Fire Safety*. 2016; 4:119-122. (rus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27521504>
8. Fadeev V.E. *Improvement of modern methods of fire resistance tests on the basis of the introduction of harmonized European standards. Actual Problems of Fire Safety: Materials of the 28th International Science and Practical Conference*. Moscow, VNIIPo, 2016; 1:305-309. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817893> (rus).
9. Shatalin S.S., Varlamov A.V., Zybina O.A., Mnatsakanov S.S. On binders in flame retardant intumescent compositions. *Design. Materials. Technology*. 2014; 4(34):37-40. (rus).
10. Zavyalov D.E., Zybina O.A., Mitrofanov V.V., Mnatsakanov S.S. Comparative study of the behaviour of ammonium phosphates in flame retardant intumescent compositions. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012; 85(1):157-159. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43912070> (rus).
11. Zavyalov D.E., Nechaev K.V., Zybina O.A., Babkin O.E., Mnatsakanov S.S. Reaction, which take place in the intumescent fire-retardant paints in the presence of carbon nanobodies. *Russian Coatings Journal/Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie*. 2012; 10:38-39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20274080> (rus).
12. Zavyalov D.E., Zybina O.A., Mnatsakanov S.S., Chernova N.S., Varlamov A.S. Fire-resistant intumescent compositions containing intercalated graphite. *Chemical industry*. 2009; 86(8):414-417. (rus).
13. Gillet M., Autrique L., Perez L. Mathematical model for intumescent coatings growth: application to fire retardant systems evaluation. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007; 40(3):883-899. DOI: 10.1088/0022-3727/40/3/030
14. Babkin O.E., Zybina O.A., Tanklevskii L.T., Mnatsakanov S.S. Diagnosis of the quality of application and effectiveness of coke-forming flame retardant coatings for metal structures. *Industrial Coatings*. 2014; 7-8:50-54. (rus).
15. Zybina O.A., Babkin O.E., Tanklevsky L.T., Mnatsakanov S.S. Formation of the intumescent layer during thermolysis of organophosphatammonium flame retardant coatings. *Galvanic World*. 2014; 5:56-58. (rus).
16. Yuan J. Intumescent coating performance on steel structures under realistic fire conditions : Doctor of Philosophy thesis, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, 2009.
17. Dowling J. Fire protection costs for structural steelwork. *New Steel Construction*. UK, 2003.
18. Sorathia U., Gracik T., Ness J., Durkin A., Williams F., Hunstad M., Berry F. Evaluation of Intumescence Coatings for Shipboard Fire Protection. *Journal of Fire Sciences*. 2003; 21(6):423-450. DOI: 10.1177/0734904103035393
19. Perez L., Autrique L., Pechoux F. Modelling and experimental testing of intumescence coatings under high thermal flux for military applications. *Fire Safety Science*. 2014.
20. Roberts T., Shirvill L., Waterton W., Buckland I. Fire resistance of passive fire protection coatings after long-term weathering. *Process Safety and Environmental Protection*. 2010; 88(1):1-19. DOI: 10.1016/j.psep.2009.09.003
21. Kandola B.S., Akonda M.H., Horrocks A.R. Use of high-performance fibres and intumescents as char promoters in glass-reinforced polyester composites. *Polymer Degradation and Stability*. 2005; 88(1):123-125. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.01.030
22. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Characterization of the performance of an intumescence fire protective coating. *Surface and Coating Technology*. 2006; 201(3-4): 979-987. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.01.026
23. Andersen J. *Experimental study of the thermal resistance of intumescence coatings exposed to different heating rates : Master of Science thesis, Civil Engineering Department, Technical University of Denmark*. Copenhagen, Denmark, 2015.
24. Li G.Q., Lou G.B., Zhang C., Wang L., Wang Y. Assess the fire resistance of intumescence coatings by equivalent constant thermal resistance. *Fire Technology*. 2012; 48(2):529-546. DOI: 10.1007/s10694-011-0243-8
25. Omrane A., Wang Y.C., Goransson U., Holmstedt G., Alden M. Intumescence coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence. *Fire Safety Journal*. 2006; 42(1):68-74. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.08.006
26. Bartholomai M., Schriever R., Schartel B. Influence of external heat flux and coating thickness on the thermal insulation properties of two different intumescence coatings using cone calorimeter and numerical analysis. *Journal of Fire Materials*. 2003; 27:151-162.
27. Zhang Y., Wang Y., Bailey C.G., Taylor A.P. Global modelling of fire protection performance of intumescence coating under different cone calorimeter heating conditions. *Fire Safety Journal*. 2012; 50:51-62. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.02.004
28. Zybina O.A., Varlamov A.B., Chernova N.S., Mnatsakanov S.S. On the role and transformations of components of intumescence fire-retardant paint-and-varnish formulations in the course of thermolysis. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2009; 82(4):1445-1449. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44519592> (rus).
29. Wang L., Dong Y., Zhang D., Zhang C. Experimental study of heat transfer in intumescence coatings exposed to non-standard furnace curves. *Fire*

- Technology. 2015; 51(3):627-643. DOI: 10.1007/s10694-015-0460-7
30. Golovina E.V. *Methodology for the evaluation of thermal resistance of intumescent-type flame retardant compositions for oil and gas facilities* : Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Ekaterinburg, 2019; 130. (rus).
31. *Assessment of fire protection properties of coatings depending on the terms of their operation: a methodology*. Moscow, VNIIPo, 2014; 31. (rus).

Поступила 07.11.2022, после доработки 21.11.2022;
принята к публикации 01.12.2022

Received November 7, 2022; Received in revised form November 21, 2022;
Accepted December 1, 2022

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 274777; Scopus Author ID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ПОРТНОВ Федор Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 1134480; Scopus Author ID: 57192372795; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Tatyana Yu. EREMINA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 274777; Scopus Author ID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Fedor A. PORTNOV, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1134480; Scopus Author ID: 57192372795; ORCID: 0000-0001-7409-0844; e-mail: f.portnov@ikbs-mgsu.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.