

Научная статья

УДК 614.841.343:539.097; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-157-170

АЛГОРИТМ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

✉ Столяров Святослав Олегович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.

Минкин Денис Юрьевич.

СПб ГУП «Горэлектротранс», Санкт-Петербург, Россия

✉ 79990252529@yandex.ru

Аннотация. Представлен комплексный расчетно-экспериментальный метод определения оптимальной толщины огнезащитных вспучивающихся покрытий для стальных строительных конструкций. Разработка метода обусловлена актуальной проблемой проектирования – невозможностью применения стандартных расчетных подходов к вспучивающимся покрытиям из-за резкого изменения их теплофизических характеристик в процессе термического разложения и сложных физико-химических превращений при высокотемпературном воздействии. Предлагаемый алгоритм интегрирует данные синхронного термического анализа, позволяющего исследовать стадии деструкции и тепловые эффекты материала, результаты натурных огневых испытаний образцов с покрытием по стандартному температурному режиму и последующее численное моделирование нестационарного теплового поля в программном комплексе «Elcut». На основе экспериментальных данных получены высокоточные регрессионные полиномиальные модели для ключевых параметров – теплоемкости и теплопроводности покрытия в функции температуры. Верификация методики на реальной конструкции (двухавр 20Б1) показала, что расхождение между расчетным и экспериментальным временем прогрева до критической температуры (500 °C) не превышает 10 %. Полученные результаты демонстрируют практическую ценность метода как эффективной альтернативы дорогостоящим и длительным натурным огневым испытаниям на стадии проектирования огнезащиты.

Ключевые слова: огнестойкость, вспучивающиеся покрытия, теплофизические характеристики, численное моделирование, синхронный термический анализ

Для цитирования: Столяров С.О., Минкин Д.Ю. Алгоритм подбора оптимальной толщины огнезащитных покрытий для металлических конструкций // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 4 (76). С. 157–170. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-157-170.

Scientific article

ALGORITHM FOR SELECTING THE OPTIMAL THICKNESS OF FIRE PROTECTIVE COATINGS FOR METAL STRUCTURES

✉ Stolyarov Svyatoslav O.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia.

Minkin Denis Yu.

Saint-Petersburg State unitary enterprise «Gorelektrotrans», Saint-Petersburg, Russia

✉ 79990252529@yandex.ru

Abstract. A comprehensive computational and experimental method for determining the optimal thickness of fire-protective intumescent coatings for steel building structures is presented. The development of this method was driven by a pressing design challenge:

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2025

the impossibility of applying standard computational approaches to intumescent coatings due to abrupt changes in their thermophysical properties during thermal decomposition and complex physicochemical transformations under high-temperature conditions. The proposed algorithm integrates data from synchronous thermal analysis, which allows for the study of degradation stages and thermal effects of the material, the results of full-scale fire tests of coated specimens under standard temperature conditions, and subsequent numerical modeling of the transient thermal field using the Elcut software package. Based on the experimental data, highly accurate regression polynomial models were obtained for key parameters – the heat capacity and thermal conductivity of the coating as a function of temperature. Verification of the method on a real structure (a 20B1 I-beam) showed that the discrepancy between the calculated and experimental heating times to the critical temperature (500 °C) does not exceed 10 %. The obtained results demonstrate the practical value of the method as an effective alternative to expensive and time-consuming full-scale fire tests at the fire protection design stage.

Keywords: fire resistance, intumescent coatings, thermophysical characteristics, numerical modeling, synchronous thermal analysis

For citation: Stolyarov S.O., Minkin D.Yu. Algorithm for selecting the optimal thickness of fire protective coatings for metal structures // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 4 (76). P. 157–170. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-157-170.

Введение

Одним из способов повышения пределов огнестойкости стальных конструкций является применение огнезащитных вспучивающихся покрытий [1]. Основными достоинствами применения таких средств огнезащиты являются: легкость нанесения, скорость ремонта после пожара, незначительное утяжеление конструкции, возможность обработки труднодоступных мест, высокие теплоизоляционные свойства [2].

Основной проблемой вспучивающихся покрытий является невозможность определения пределов огнестойкости защищаемых металлических конструкций расчетно-аналитическим методом [3]. Основное препятствие применения методики расчета связано с непостоянством теплофизических характеристик в процессе теплового воздействия, сложности физико-химического процесса реализации механизмов огнезащиты и неоднородности теплоизолирующего слоя, что приводит к необходимости проведения испытаний при воздействии нагрузки в соответствии с ГОСТ 30247.1–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции» (ГОСТ 30247.1–94) [4]. Данное положение ограничивает применение огнезащитных вспучивающихся покрытий в сравнении с конструктивными средствами огнезащиты [5]. Таким образом, разработка методики определения фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными вспучивающимися покрытиями расчетно-аналитическим методом позволит применять средства без проведения испытаний, что сократит временные и финансовые ресурсы на проектирование и монтаж, а также обеспечит конкурентоспособность лакокрасочных огнезащитных материалов по сравнению с другими видами огнезащиты [6].

Решение данной задачи возможно посредством определения теплофизических свойств огнезащитных вспучивающихся покрытий и адаптацией их особенностей к существующим расчетным методам определения фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с нанесенными средствами огнезащиты.

Объект исследования – расчетные методы определения пределов огнестойкости стальных конструкций с огнезащитными вспучивающимися покрытиями.

Предмет исследования – корреляция теплофизических характеристик огнезащитных вспучивающихся покрытий в решении теплофизической задачи подтверждения пределов огнестойкости стальных конструкций.

Цель исследования – определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с нанесенным огнезащитным вспучивающимся покрытием.

Для достижения цели предполагалось решить следующие частные задачи:

- исследовать динамику изменения теплофизических характеристик в процессе термического разложения огнезащитных вспучивающихся покрытий;
- решить теплофизическую задачу с использованием экспериментальных данных по огнезащитной эффективности средств огнезащиты;
- разработать алгоритм подбора оптимальной толщины огнезащитных вспучивающихся покрытий.

Материалы методы исследования

В качестве базового огнезащитного покрытия выбрано огнезащитное покрытие на основе эпоксидных смол и отвердителя полиэтиленполиамин (ПЭПА).

Для исследования динамики изменения теплофизических характеристик в процессе термического разложения огнезащитных вспучивающихся покрытий были проведены испытания на огнезащитную эффективность с учетом приложения к стальной колонне статической нагрузки в соответствии с методом, указанным в ГОСТ 53295–2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности» в приложении Б и без нее.

Термические свойства исследовались методом синхронного термического анализа (СТА) по ГОСТ 53293–2009 «Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа» на установке STA 449 F3 JUPITER [7]. Исследование термической стабильности осуществлялось в платиновых тиглях (Pt/Rh), в среде воздуха, при скорости подачи газа 75 мл/мин и скорости нагрева 10 °С/мин.

Теплотехническая часть расчета выполняется с использованием метода расчета прогрева стальных неограниченных пластин с огнезащитой. Для этого предварительно построены номограммы прогрева стальных конструкций с исследуемой огнезащитой на основании ранее проведенных экспериментов с аналогичными конструкциями по ГОСТ 59637–2021 «Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте» [8]. Далее определение предела огнестойкости проводится с помощью номограмм.

Коэффициенты изменения теплопроводности и теплоемкости облицовки при нагреве определяются с помощью ЭВМ, методом подбора. Для этого строятся несколько моделей испытанных ранее конструкций и проводится ряд теплотехнических расчетов с использованием подобранных свойств материалов по методу, описанному в п. 8.3.2. СТО АРСС 11251254.001-018-03 «Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок».

Для определения теплофизических характеристик огнезащитного покрытия произведен теплотехнический расчет с использованием программного продукта «Elcut», компании ООО «Тор» [9]. Для решения поставленной задачи был выбран тип задачи – теплопередача нестационарная. Расчет производится до 5 400 с, с шагом в 300 с. Начальная температура составляет 20 °С.

Металлическая конструкция представляет собой стандартный двутавр 2051 класса” стали С255. В качестве средства огнезащиты выбран материал на основе эпоксидных смол с толщиной защитного слоя 82 мм, что соответствует коэффициенту вспучивания 150.

Численное моделирование теплопереноса выполнено в специализированном программном комплексе «Elcut». Геометрия модели (двутавр с покрытием) была воспроизведена с учетом реальных размеров поперечного сечения. Физические свойства материалов (сталь, вспучивающееся покрытие) задавались блоками с присвоением соответствующих температурно-зависимых характеристик. Граничные условия (тепловое

воздействие по стандартной температурной кривой, теплообмен на необогреваемых поверхностях) применялись к ребрам и вершинам расчетной области [10].

Для ключевого нелинейного материала – вспучивающегося огнезащитного покрытия – были установлены и аппроксимированы температурные зависимости коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости. Эти зависимости, представленные в виде полиномиальных моделей второй степени, использовались в качестве входных данных для численного расчёта.

На обогреваемую поверхность модели в качестве граничного условия первого рода (заданная температура) было наложено изменение температуры по стандартной кривой пожара:

$$T = 345Lg(8t + 1) + 20. \quad (1)$$

На необогреваемых поверхностях модели задавалось комплексное граничное условие теплообмена, включающее конвекцию и излучение. Суммарный тепловой поток описывался выражением:

$$Fn = \alpha(T - T_0);$$

$$\alpha = 25B_T/K * m^2;$$

$$T_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Радикация теплового излучения на необогреваемой поверхности модели описывалась функцией:

$$Fn = \beta * k_{sb} * (T^4 - T_0^4);$$

$$\beta = 0,5;$$

$$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Задается сетка расчетов. Выделяется расчетная площадь, задается шаг сетки автоматически.

Графическое изображение модели представлено на рис. 1.

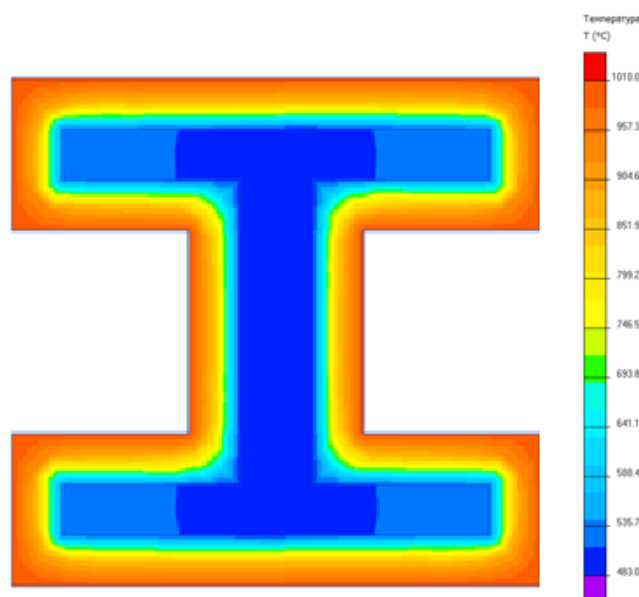


Рис. 1. Модель прогрева стального двутавра 20Б1 с огнезащитным вспучивающимся покрытием на основе эпоксидных смол

По результатам моделирования были построены модели регрессии для решения теплотехнической задачи.

Результаты исследования

Исследование огнезащитной эффективности

Результаты натурных испытаний огнезащитной эффективности огнезащитных вспучивающихся покрытий на основе эпоксидных смол представлены на рис. 6. По результатам исследования огнезащитной эффективности видно, что исследуемый образец с огнезащитным покрытием толщиной 5,5 мм достигает критической температуры (500°C) и предельно допустимой вертикальной деформации, определяемой по ГОСТ 30247.1–94, через 90 мин после начала огневого воздействия.

Теплотехнические характеристики материалов представлены на рис. 2–5.

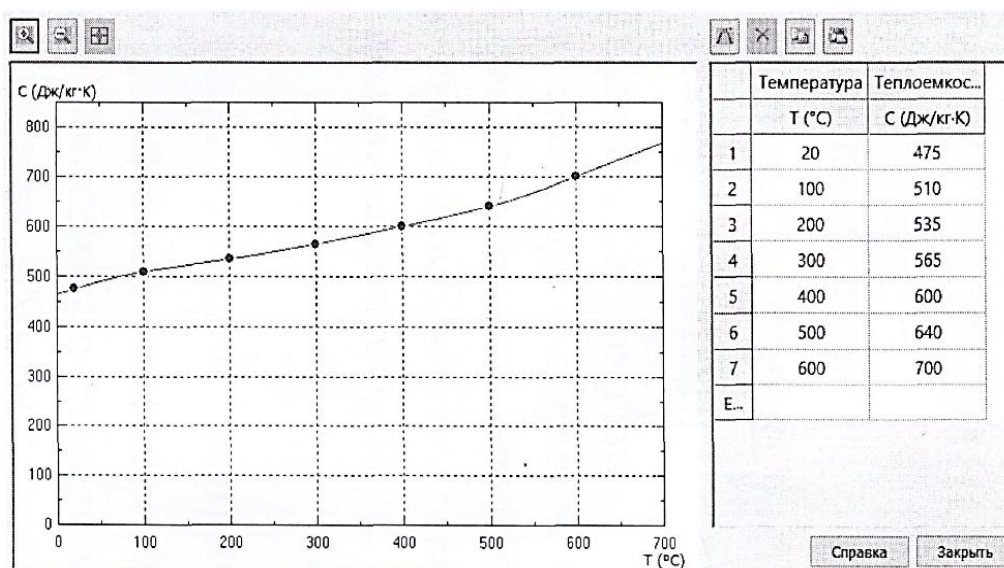


Рис. 2. График зависимости теплоемкости металлической конструкции от температуры

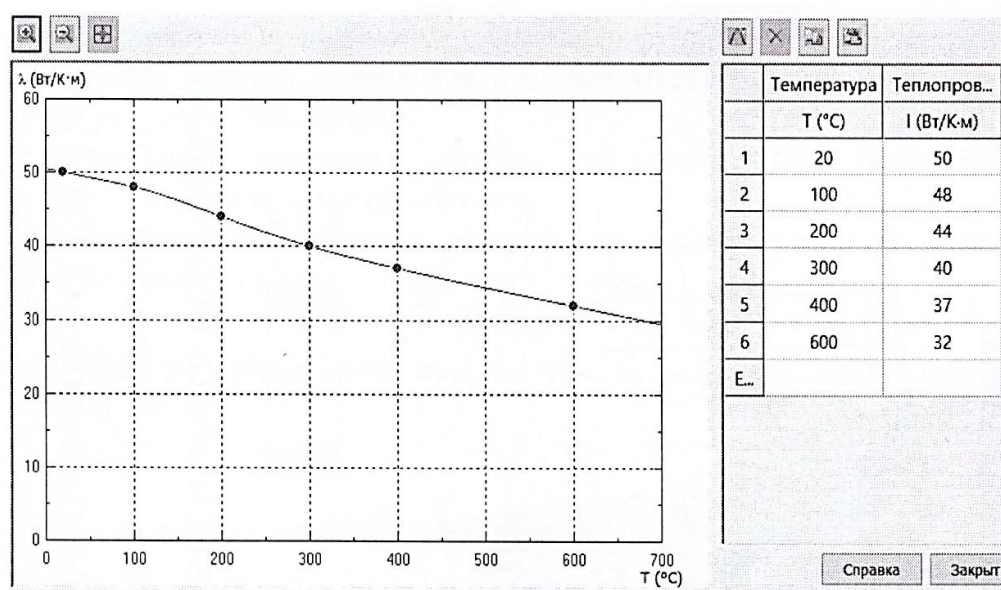


Рис. 3. График зависимости теплопроводности металлической конструкции от температуры

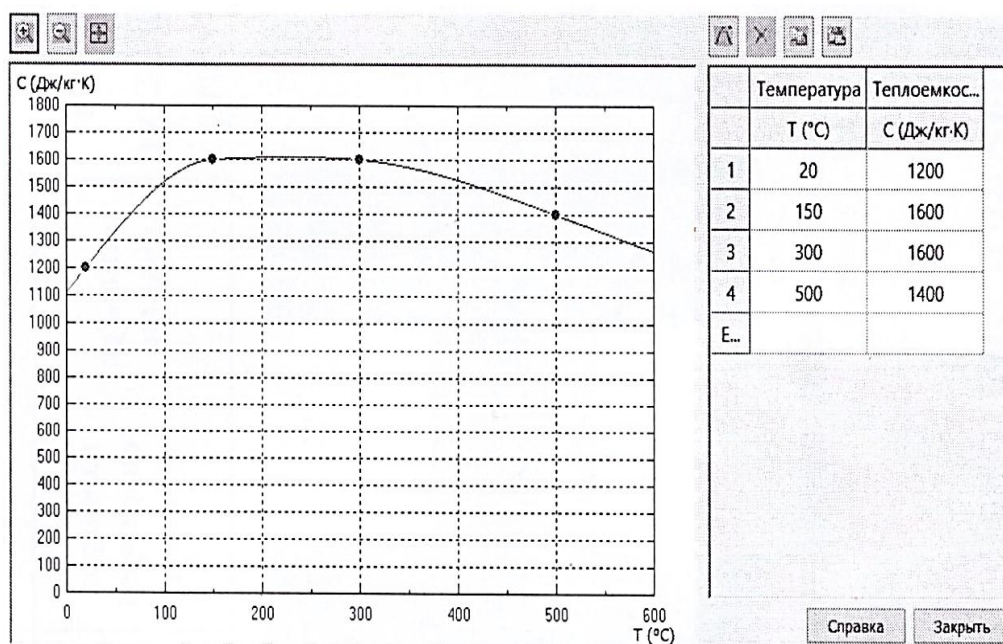


Рис. 4. График зависимости теплоемкости
огнезащитного вспучивающегося покрытия от температуры

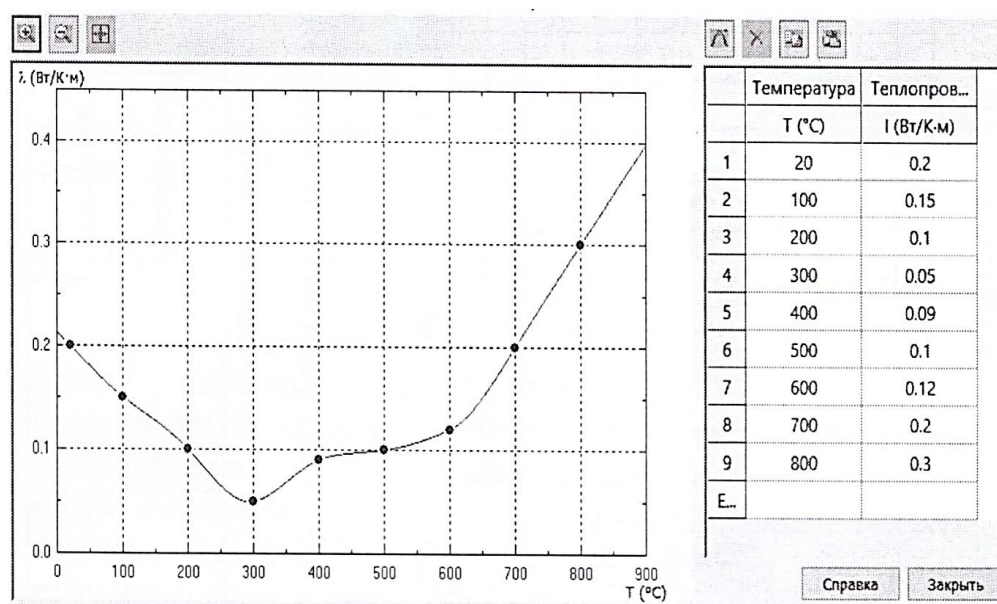


Рис. 5. График зависимости теплопроводности
огнезащитного вспучивающегося покрытия от температуры

По результатам моделирования видно, что огнезащитный состав способен обеспечить требуемый предел огнестойкости металлических конструкций при толщине, указанной в технической документации на средство огнезащиты.

Для определения времени наступления предельного состояния использованы экспериментальные данные, полученные по результатам испытаний. Критическим (предельным) состоянием принято достижение образцом температуры 500 °C. Параметры (коэффициенты) модели подбирались из условия, чтобы расхождение между расчётными и экспериментальными данными не превышало 10 %. Совмещенный график результатов испытаний и моделирования представлен на рис. 6.

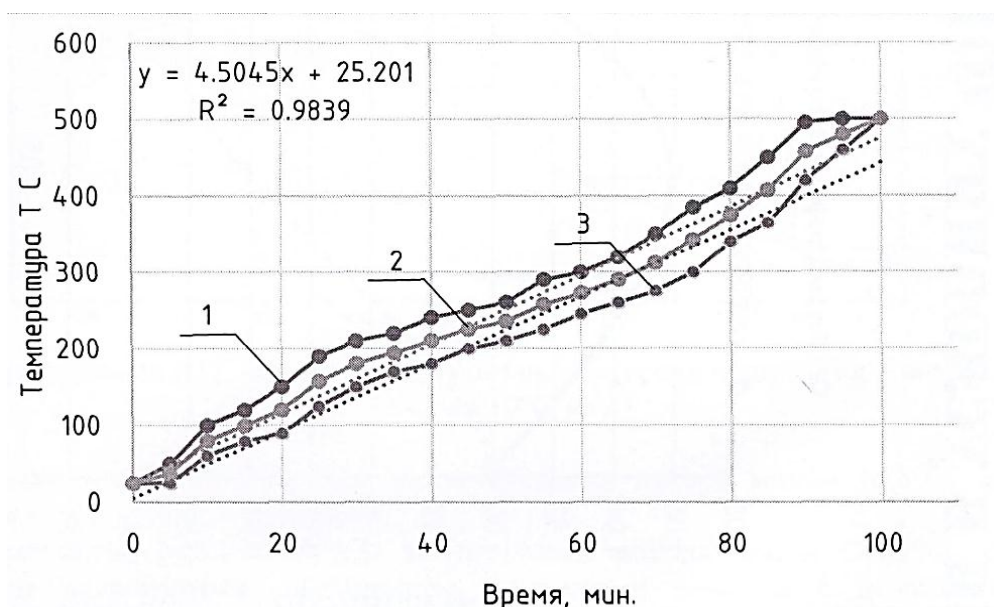


Рис. 6. Термограммы прогрева металлоконструкций по результатам огневых испытаний:
1 – металлоконструкция под нагрузкой; 2 – термограмма, построенная методом
наименьших квадратов; 3 – металлоконструкция без нагрузки

Исследование теплофизических характеристик огнезащитного покрытия

Модели регрессии теплотехнических характеристик вспучивающегося покрытия на основе эпоксидных смол представлены в табл. 1.

Таблица 1

Модели регрессии теплотехнических характеристик
огнезащитного вспучивающегося покрытия на основе эпоксидных смол

№ п/п	Исследуемый параметр	Модель	Величина достоверности аппроксимации	Параметры модели регрессии
1	Теплоемкость	$Y = -0.0059x^2 + 3,4154x + 1158$	$R^2=0,9344$	Полиномиальная 2-ой степени
2	Теплопроводность	$Y = 1E - 0,6x^2 + 0,0008x + 0,2182$	$R^2=0,9727$	Полиномиальная 2-ой степени

Исследование синхронного термического анализа

Результаты СТА исследуемого покрытия представлены на рис. 7–9. Термограмма дифференциальной термической гравиметрии (ДТГ) (рис. 7) показывает скорость потери массы материала (%/мин) при нагреве, что позволяет точно определить температурные участки этапов вспучивания и деструкции.

Первый этап (~90–200 °C): незначительная потеря массы (6,8 %), связанная с испарением влаги и легких примесей.

Второй этап (~200–350 °C): значительная потеря массы (28,2 %), связанная с разложением катализатора, выделением кислоты и реакции с полиолом, а также образованием многоатомного спирта.

Третий этап (~350–500 °C): потеря массы (11,81 %) – основной пик деструкции полимера, связан с образованием кокса.

Четвертый этап (~500–650 °C): потеря массы (15,30 %) – связан с разложением газообразователей и выделением газов. На данном этапе происходит образование защитного слоя.

Пятый этап (~650–900 °C): потеря массы (12,00 %) – связан с разложением источника углерода и карбонизацией защитного слоя.

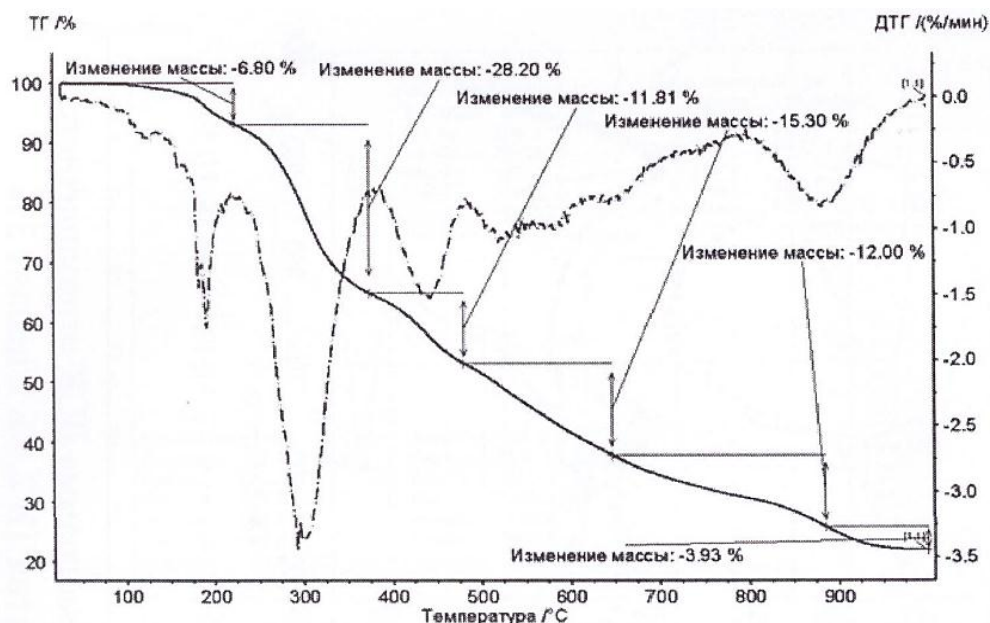


Рис. 7. Термограмма ДТГ огнезащитного покрытия
(среда испытания – воздух, скорость нагрева – 10 °C/мин)

На основании представленной термограммы ДСК можно сделать следующие выводы о поведении теплопроводности материала при нагреве:

- в низкотемпературной области (до 180 °C) отсутствуют значительные тепловые эффекты. Теплопроводность остается относительно стабильной. Значение теплопроводности определяется исходным составом (наполнители, смола);

- первая фаза изменений (180–200 °C): наблюдается небольшой экзотермический эффект (7,823 Дж/г). Теплопроводность может незначительно увеличиться;

- в основной фазе деструкции наблюдается ярко выраженный экзотермический пик (49,88 Дж/г). Интенсивное тепловыделение объясняется формированием пористого коксового слоя, что приводит к снижению плотности материала, увеличению термического сопротивления, снижению эффективной теплопроводности;

- в высокотемпературной области прослеживается дополнительный экзотермический процесс (57,91 Дж/г), в которой теплопроводность продолжает снижаться из-за: увеличения пористости, разрушения теплопроводящих путей. Мощный экзотермический пик (717,6 Дж/г), полное окисление углеродного остатка, теплопроводность определяется: минеральным остатком (золой), пористой структурой и фазовым составом продуктов разложения.

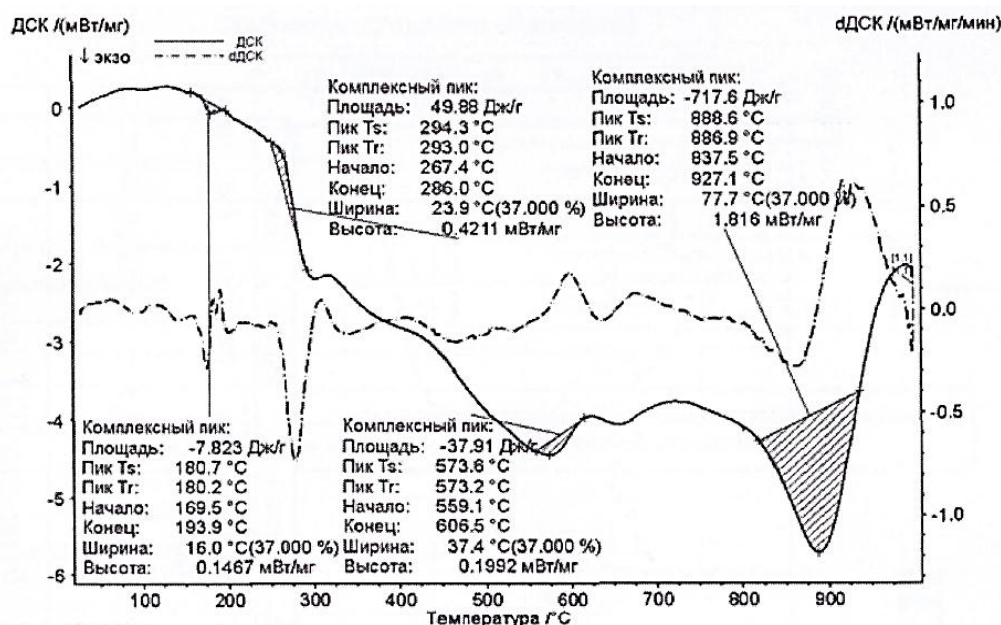


Рис. 8. Термограмма ДСК огнезащитного покрытия
(среда испытания – воздух, скорость нагрева 10 °C/мин)

Термограмма дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (рис. 8) показывает тепловые эффекты, происходящие в материале при нагреве. На графике видны экзотермические и эндотермические процессы, связанные с фазовыми переходами, разложением и другими реакциями.

Деструкция эпоксидной смолы происходит в несколько стадий:

1. Начальные процессы (~190 °C) – возможное испарение примесей.
2. Основное разложение (~290 °C) – термоокислительная деструкция.
3. Высокотемпературные процессы (выше 550 °C) – разложение наполнителей и кокса.

Если в составе есть гидроксиды металлов ($\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$), их разложение (~200–300 °C) сопровождается поглощением тепла и выделением воды, что снижает температуру материала.

Фосфорные модификаторы способствуют образованию кокса, что видно по высокотемпературному пику (~573 °C).

Пик при ~290 °C критичен для огнезащиты – в этом диапазоне материал начинает активно разлагаться, и важно, чтобы покрытие формировало теплоизолирующий слой.

Высокотемпературная стабильность (до 900 °C) указывает на наличие термостойких компонентов.

Методика подтверждения пределов огнестойкости металлических конструкций с огнезащитным вспучивающимся покрытием

Методика подтверждения пределов огнестойкости металлических конструкций с огнезащитным покрытием основывается на алгоритме определения фактических пределов огнестойкости, представленного в приложении А ГОСТ 59637–2021 «Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте». В методике предлагается дополнить действие «Расчет теплофизических характеристик облицовки» по следующему алгоритму (рис. 10).

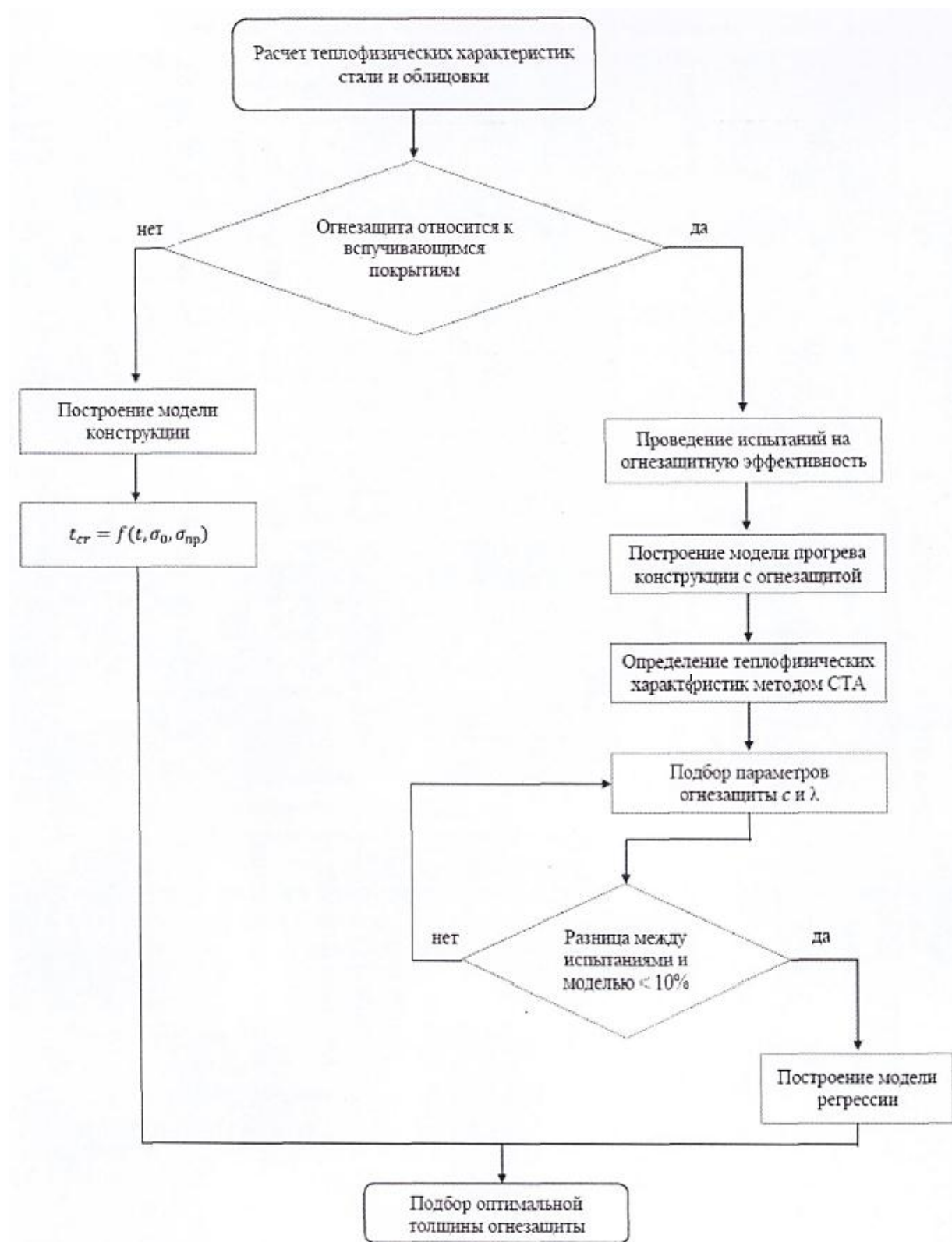


Рис. 9. Алгоритм подбора оптимальной толщины огнезащитного покрытия

Алгоритм расчета теплофизических характеристик стали и облицовки с огнезащитой:

1. Определение типа огнезащиты:

– проверяется, относится ли огнезащитное покрытие к вспучивающимся материалам;

– если «да», алгоритм переходит к следующему шагу (проведение испытаний на огнезащитную эффективность).

– если «нет», создается математическая или численная модель конструкции, учитывающая:

временные параметры (t);

начальные напряжения (σ_0);

предельные напряжения (σ_{np}).

Критическое время ($t_{кр}$) вычисляется как функция этих параметров.

2. Экспериментальные испытания.

– проводятся натурные испытания для оценки огнезащитной эффективности покрытия.

3. Моделирование прогрева конструкции.

– строится модель прогрева конструкции с учетом огнезащитного слоя.

4. Расчет теплофизических характеристик.

– используется метод СТА для определения:

теплопроводности (λ);

теплоемкости (c);

других параметров.

5. Проверка точности модели.

Сравниваются данные испытаний и результаты моделирования:

– если расхождение менее 10 % (в соответствии с методикой ФГБУ ВНИИПО МЧС России «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Расчетно-экспериментальный метод определения предела огнестойкости несущих металлических конструкций с тонкослойными огнезащитными покрытиями»), алгоритм продолжается;

– если расхождение больше, требуется уточнение модели или параметров.

6. Построение регрессионной модели.

– на основе полученных данных создается статистическая модель регрессии для прогнозирования поведения системы.

7. Оптимизация огнезащиты.

– подбирается оптимальная толщина огнезащитного слоя, обеспечивающая баланс между:

защитными свойствами;

экономической целесообразностью;

механической нагрузкой на конструкцию.

Итог: алгоритм «Подбора оптимальной толщины огнезащитного покрытия» сочетает экспериментальные данные, численное моделирование и статистический анализ для проектирования эффективной огнезащиты стальных конструкций. Ключевые этапы включают верификацию модели и итеративный подбор параметров.

Обсуждение результатов исследования

Исследование динамики изменения теплофизических характеристик показало, что теплоемкость при 20 %С составляет около 1 200 Дж/кг*К. При реализации процесса вспучивания и образования защитного теплоизолирующего слоя показатель увеличивается и стабилизируется. После формирования защитного слоя и завершения процесса вспучивания происходит постепенное выгорание термостойкого наполнителя, вследствие чего теплоемкость снижается.

Показатель теплопроводности при образовании защитного слоя снижается и претерпевает более динамичные изменения вследствие физико-химических превращений.

Теплофизические характеристики, полученные по результатам настоящего исследования, являются приблизительными, так как определялись методом подбора с опорой на результаты СТА, который не может служить полностью достоверным способом их идентификации, с погрешностью 10–20 %. Однако сравнение результатов огнезащитной

эффективности при моделировании и в натурных испытаниях показывает, что результат расчета приемлем. Сравнение экспериментальных и модельных данных показало систематическое опережение модели: среднее отклонение по времени достижения температур является отрицательным. При этом лишь в 20 % случаев модель демонстрировала запаздывание относительно эксперимента.

Создание расчётной модели вспучивающегося огнезащитного покрытия, способной прогнозировать его тепловое и физическое состояние при нагреве, затруднено из-за неоднородности структуры и сложного массообмена. Поэтому при математическом моделировании процесса вспучивания в качестве ключевых переменных используются потеря массы, а также изменения объёма, плотности и пористости в ходе нагрева.

Полученные модели регрессии, которые подтверждены испытаниями, позволяют провести расчеты по двум подходам, в зависимости от поставленной задачи, как в условиях стандартного температурного режима, так и в условиях реального пожара (с учетом того что стандартный температурный режим не учитывает фазу возгорания, фазу развивающегося пожара и фазу затухания, то скорость роста температуры реального пожара будет ниже стандартного температурного режима пожара. При моделировании реального режима пожара и определения алгоритма роста температуры и подставляя данную зависимость в формулу (1), представляется возможным определить предел огнестойкости защищаемой конструкции с огнезащитой). Для каждого огнезащитного состава после проведения сертификационных испытаний представляется возможным построить соответствующие модели.

Вывод

Проведенное исследование предлагает комплексный расчетно-экспериментальный подход к решению ключевой проблемы проектирования огнезащиты – объективному определению оптимальной толщины вспучивающихся покрытий для стальных конструкций без проведения полномасштабных огневых испытаний для каждого конкретного случая.

Научная новизна работы заключается в разработанном методе корреляции, который устанавливает прямую количественную связь между:

- данными СТА, фиксирующими этапы деструкции и тепловые эффекты материала;
- результатами натурных огневых испытаний по стандартному режиму;
- теплофизическими параметрами (теплопроводностью и теплоемкостью), описанными в виде полиномиальных регрессионных моделей высокой точности ($R^2 > 0,93$) в функции температуры. Этот подход позволяет перейти от качественного описания поведения покрытия к его строгому математическому моделированию в условиях нестационарного теплового воздействия.

Теоретическая значимость состоит в адаптации классической теплофизической задачи к специфике вспучивающихся систем. Предложенный алгоритм, интегрированный в программный комплекс «Elcut», позволяет учесть:

- резкое нелинейное изменение теплофизических характеристик в процессе вспучивания и карбонизации;
- формирование неоднородного пористого теплоизолирующего слоя с переменными во времени свойствами.

Таким образом, работа вносит вклад в развитие методов моделирования тепломассопереноса в реагирующих гетерогенных средах.

Практическая значимость и верификация методики подтверждены на реальном элементе – двутавре 20Б1. Расхождение между расчетным и экспериментальным временем прогрева до критической температуры 500 °С не превысило 10 %, что соответствует требованиям современных нормативных документов. Это позволяет утверждать, что разработанный алгоритм является эффективным инженерным инструментом, который обеспечивает сокращение затрат финансовых и временных издержек на этапе проектирования,

повышение гибкости проектирования, возможность оперативного подбора оптимальной (минимально достаточной) толщины покрытия для конструкций любой сложности и конфигурации.

Исследована динамика изменения теплофизических характеристик в процессе термического разложения огнезащитных вспучивающихся покрытий.

Решена теплофизическая задача с использованием экспериментальных данных по огнезащитной эффективности средств огнезащиты.

Разработан алгоритм подбора оптимальной толщины огнезащитных вспучивающихся покрытий.

Список источников

1. Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures / L. Vakhitova [et al.] // *Heliyon*. 2024. Т. 10. № 14.
2. Smart Polydimethylsiloxane Materials: Versatility for Electrical and Electronic Devices Applications / X. Yang [et al.] // *Advanced Materials*. 2025. Т. 37. № 17. С. 2500472.
3. Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: Current approaches for qualification and design / D. de Silva [et al.] // *Coatings*. 2022. Т. 12. № 5. С. 696.
4. Еремина Т.Ю., Уткин С.В. Исследование изменений свойств огнезащитных покрытий интумесцентного типа методом термомеханического анализа // *Пожаровзрывобезопасность*. 2024. Т. 33. № 2. С. 32–41.
5. Еремина Т.Ю., Уткин С.В. Исследование изменений свойств огнезащитных покрытий интумесцентного типа методом термомеханического анализа // *Пожаровзрывобезопасность*. 2024. Т. 33. № 2. С. 32–41.
6. Уктамжонов М.М. Применение вспучивающихся огнезащитных покрытий при транспортировке и хранении нефтепродуктов. 2021.
7. Шипицын А.П., Непомилуев А.М., Тюрнина А.Е. Стандартные образцы температуры фазовых переходов (температуры Кюри) на основе алюминия, никеля и силицида железа // *Эталон. Стандартные образцы*. 2023. Т. 19. № 2. С. 35–46.
8. Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде) / Д.А. Корольченко [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. 2022. Т. 31. № 6. С. 30–46.
9. Теплофизические характеристики стали и огнезащитных покрытий при нормированных температурных режимах пожара / В. Голованов [и др.] // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2023. № 4. С. 69–78.
10. Романова Е.Б., Евстропьев С.К., Кузнецов А.Ю. Практические задания в системе ELCUT: учеб.-метод. пособие.

References

1. Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures / L. Vakhitova [et al.] // *Heliyon*. 2024. Т. 10. № 14.
2. Smart Polydimethylsiloxane Materials: Versatility for Electrical and Electronic Devices Applications / X. Yang [et al.] // *Advanced Materials*. 2025. Т. 37. № 17. P. 2500472.
3. Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: Current approaches for qualification and design / D. de Silva [et al.] // *Coatings*. 2022. Т. 12. № 5. P. 696.
4. Eremina T.Yu., Utkin S.V. Issledovanie izmenenij svojstv ognezashchitnyh pokrytij intumescentnogo tipa metodom termomekhanicheskogo analiza // *Pozharovzryvbezopasnost'*. 2024. Т. 33. № 2. S. 32–41.
5. Eremina T.Yu., Utkin S.V. Issledovanie izmenenij svojstv ognezashchitnyh pokrytij intumescentnogo tipa metodom termomekhanicheskogo analiza // *Pozharovzryvbezopasnost'*. 2024. Т. 33. № 2. S. 32–41.

6. Uktamzhonov M.M. Primenenie vspuchivayushchihsya ognезashchitnyh pokrytij pri transportirovke i hranenii nefteproduktov. 2021.
7. Shipicyn A.P., Nepomiluev A.M., Tyurnina A.E. Standartnye obrazcy temperatury fazovyh perekhodov (temperatury Kyuri) na osnove alyumeli, nikelya i silicida zheleza // Etalony. Standartnye obrazcy. 2023. T. 19. № 2. S. 35–46.
8. Modelirovanie nomogramm progrena stal'nyh konstrukcij s ognезashchitnymi pokrytijami razlichnoj tolshchiny (na vode) / D.A. Korol'chenko [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2022. T. 31. № 6. S. 30–46.
9. Teplofizicheskie harakteristiki stali i ognезashchitnyh pokrytij pri normirovannyh temperaturnyh rezhimah pozhara / V. Golovanov [i dr.] // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. 2023. № 4. S. 69–78.
10. Romanova E.B., Evstrop'ev S.K., Kuznecov A.Yu. Prakticheskie zadaniya v sisteme ELCUT: ucheb.-metod. posobie.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 07.10.2025; одобрена после рецензирования: 30.10.2025; принята к публикации: 02.12.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 07.10.2025; approved after review: 30.10.2025; accepted for publication: 02.12.2025

Информация об авторах:

Столяров Святослав Олегович, доцент кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, e-mail: 79990252529@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6460-209X>, SPIN-код: 9196-5570

Минкин Денис Юрьевич, директор СПб ГУП «Горэлектротранс» (196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., д. 15), доктор технических наук, профессор, e-mail: dunkel@mail.ru, SPIN-код: 7698-0168

Information about the authors:

Stolyarov Svyatoslav O., associate professor at the department of building fire safety and automated fire fighting systems of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: 79990252529@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6460-209X>, SPIN: 9196-5570

Minkin Denis Yu., director of the Saint-Petersburg state unitary enterprise «Gorelektrotrans» (196105, Saint-Petersburg, Syzranskaya str., 15), doctor of technical sciences, professor, e-mail: dunkel@mail.ru, SPIN: 7698-0168