

РАЗРАБОТКА ОГНЕСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Коростилёв Л. И., Кочанов В. Ю., Гейко С. П., Юреско Т. А.

1. Введение

Разработка огнестойких материалов и покрытий в Украине является стратегическим направлением в сфере рационального использования и защиты материальных и топливно-энергетических ресурсов. Актуальность оптимизации состава огнестойких вспучивающихся покрытий (ОВП) обусловлена тем, что они относительно тонкослойны, при нагревании не выделяют значительного количества токсичных веществ, обладают высокой огнезащитной эффективностью. А также могут быть нанесены на защищаемую поверхность различными механизированными методами. При воздействии высокой температуры толщина и объем ОВП увеличиваются в десятки раз за счет образования негорючего и твердого вспененного слоя (кокса) плотностью $3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$ г/см³ и коэффициентом теплопередачи, близким к воздуху.

Особенно эффективны ОВП при пожарах в замкнутых пространствах инженерных сооружений – судовых помещениях, атомных и тепловых электростанциях, на предприятиях нефтехимической промышленности и на других потенциально опасных объектах.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объект исследования – состав огнестойких вспучивающихся покрытий.

Основной проблемой огнезащиты электрических кабелей при пожаре в замкнутом пространстве является высокая концентрация токсических веществ в составе продуктов сгорания, что затрудняет проведение работ по ликвидации пожара. Это связано с тем, что полимерная изоляция кабелей (полиэтилен, поливинилхлорид) и традиционные огнезащитные покрытия на основе эпоксидных и фенольных смол содержат в своем составе потенциально опасные вещества. Данные вещества при сгорании образуют токсичные соединения (хлор, угарный газ, цианистый водород).

Для выявления особенностей работы покрытия при пожаре проведено экспериментальное исследование различных составов огнестойких вспучивающихся покрытий на основе потенциально безопасной кремнийорганической смолы.

На начальном этапе разработки состава ОВП в качестве связующего выбрана полиорганосилоксановая смола («Пентэласт 712А» или ее аналог), которая обладает хорошими технологическими характеристиками (имеет низкую вязкость и отверждается при температурах 20–30 °С), нетоксична и водостойка. К недостаткам смолы следует отнести невысокую механическую (1,5–3 МПа) и адгезионную прочность (до 0,3 МПа), которые возможно повысить за счет применения праймера (специальной грунтовки для улучшения адгезии). Для придания ОВП способности вспучиваться при резком повышении температуры в его состав предлагается ввести следующие минеральные и полимерные мелкодисперсные наполнители:

– гидроксиды щелочноземельных металлов $\text{Al}(\text{OH})_3$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$ – мелкодисперсные порошки практически нерастворимые в воде (0,12–0,16 %), при температурах 190–230 °С и 270–300 °С, соответственно, разлагаются с выделением воды. При этом поглощается значительное количество тепловой энергии, что делает гидроксиды алюминия и магния эффективными антипиренами. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и $\text{Al}(\text{OH})_3$ нетоксичны;

– пентаэритрит $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$ и меламин $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$ – синтетические продукты, малорастворимые в воде (до 6 % и 0,5 % соответственно при 20 °С). Температура деструкции пентаэритрита составляет 275 °С, меламина – 354 °С. В составе ОВП данные наполнители выполняют функции углеродсодержащего и вспенивающего компонентов, необходимых для образования пенококсового слоя. Пентаэритрит и меламин являются слаботоксичными продуктами;

– полифосфат аммония $(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$ при $n > 1000$ – синтетический продукт, практически нерастворим в воде (0,25 %). Температура деструкции составляет 270 °С. В составе ОВП, полифосфат аммония является газообразователем, необходимым для создания пенококсового слоя, и источником фосфорной кислоты, которая препятствует горению углеродсодержащих компонентов. Полифосфат аммония является слаботоксичным продуктом.

Таким образом, все основные компоненты огнестойкого покрытия интумесцентного типа изначально удовлетворяют требованиям по теплостойкости, имеют низкие водопоглощение и токсичность. Кроме того, малый размер частиц наполнителей позволяет создавать покрытия толщиной 300–500 мкм, что положительно скажется на технико-экономических характеристиках ОВП.

Механизм работы ОВП интумесцентного типа при выбранном составе компонентов предполагается следующим.

На начальных стадиях повышения температуры (до 190–200 °С) огнестойкое покрытие не претерпевает видимых изменений структуры материала ввиду высокой теплостойкости кремнийорганической смолы. Далее при росте температуры начинается разложение $\text{Al}(\text{OH})_3$ с выделением воды и частичным вспениванием ОВП. При повышении температуры до 270 °С начинаются химические процессы, связанные с разложением $(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$ и $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$, интенсивным газовыделением и вспениванием поверхностных слоев ОВП. При этом начинается образование коксового слоя. Практически сразу, при температуре 290 °С начинается термическое разложение гидроксида магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ с выделением воды, дополнительным вспениванием ОВП и отводом тепла. Образующийся при этом оксид магния MgO укрепляет коксовый слой. При температуре 350 °С разлагается последний из активных компонентов – $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$, который играет роль пленкообразующего и вспенивающего агента и окончательно закрепляет пенококсовый слой ОВП. Следует отметить, что при действии открытого пламени на поверхность температура возрастает очень быстро, потому все термохимические процессы происходят практически одновременно, но затрагивают только очень тонкий наружный слой огнестойкого покрытия. За счет вспенивания толщина ОВП увеличивается более чем 20–30 раз, образуя толстый и негорючий слой пенококсовый с низкой теплопроводностью, который надежно защищает внутренние слои материала. Поэтому необходимости в увеличении толщины огнестойкого покрытия более 1–2 мм обычно не существует.

В условиях пожара, функцию активных компонентов ОВП выполняют мелкодисперсные наполнители, а кремнийорганическая смола термически разлагает-

ся до оксида кремния и является химически нейтральной. В связи с этим представляет интерес оптимизировать состав ОВП и максимально увеличить содержание наполнителя, но без ущерба для технологических характеристик композиции.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – оптимизация состава ОВП для повышения его огнезащитных свойств. При этом само ОВП должно быть адаптировано для нанесения на электрические кабели непосредственно на месте их монтажа в замкнутых помещениях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить влияние состава ОВП на основе кремнийорганической смолы, а именно соотношения компонентов интумесцентного комплекса – полифосфата аммония, пентаэритрита и меламина, на огнезащитные свойства покрытия.
2. Снизить токсичность как компонентов ОВП, так и продуктов его термодеструкции при пожаре.

4. Исследование существующих решений проблемы

ОВП являются многокомпонентными композиционными материалами. При воздействии пламени в интумесцентных покрытиях по мере нарастания температуры последовательно протекают различные физико-химические процессы, в результате которых образуется устойчивый пенококсовый слой с низкой теплопроводностью, который на некоторое время защищает конструкцию от действия высоких температур. Интумесцентные технологии являются наиболее эффективным средством защиты при пожарах [1].

В последние годы сформировалось направление по созданию ОВП, которые не содержат галоидных соединений, так как летучие продукты их термического разложения являются токсичными и коррозионно-активными веществами [2].

ОВП на основе минеральных вяжущих (цементных, алюмосиликатных) относительно дешевы, но имеют большой коэффициент температурного расширения и низкую водостойкость, поэтому имеют при эксплуатации невысокую адгезию к различным поверхностям [3, 4].

Применение в качестве связующих ОВП различных полимеров в виде синтетических смол и их водных дисперсий позволяет существенно повысить их водостойкость и адгезионную прочность, уменьшить массу и толщину покрытий. Однако, при этом возрастает количество выделяемых при пожаре токсических веществ и дыма, особенно при использовании в ОВП эпоксидных смол [5]. Применение водных дисперсий полимеров [6], снижает водостойкость композиции ОВП. Особенно неблагоприятными условиями для эксплуатации покрытий является тропический климат, что сужает географию и сферу их применения.

Вспучивание покрытий возможно при наличии в их составе интумесцентного комплекса, который состоит из полифосфата аммония, пентаэритрита и меламина. На степень вспучивания влияет соотношение между этими компонентами, тип связующего и наличие других функциональных наполнителей [7, 8], причем толщина покрытия может увеличиваться в десятки раз.

Установить механизм взаимодействия между отдельными компонентами интумесцентных покрытий затруднительно, ввиду высокой скорости их нагрева при

пожаре. Могут происходить различные реакции между компонентами покрытия, особенно при высоких температурах. При этом сложно предсказать направление высокотемпературных реакций. Взаимодействие между компонентами интумесцентного комплекса обычно сводится к их последовательному эндотермическому разложению с выделением большого количества негорючих газов – углекислого газа, аммиака и паров воды, которые уносят значительное количество теплоты, а твердая фаза продуктов химических реакций образует пенококс [9].

Пенококс представляет собой твердую пористую структуру с низким коэффициентом теплопроводности, которая способна некоторое время защищать поверхность от воздействия пламени. Эффективность такой защиты во многом определяется исходной толщиной ОВП и коэффициентом его всучивания [10].

Компоненты стандартного интумесцентного комплекса начинают вспучиваться при температурах выше 250 °С, в то время как температура начала воспламенения древесины и размягчения большинства полимеров менее 200 °С.

Поэтому в состав ОВП вводят минеральные наполнители, содержащие связанную воду – гидроксиды щелочноземельных металлов (алюминия, магния), которые выделяют воду при температурах 190–270 °С и защищают поверхность на начальной стадии нагрева [11, 12]. Минеральные наполнители нетоксичны, эффективны и относительно недороги, что повышает интерес к их применению в качестве антипиренов.

Состав большинства разработанных ОВП [13, 14] в различных пропорциях содержит компоненты интумесцентного комплекса и функциональные наполнители, а в качестве связующего применяют либо токсичные смолы, либо нестойкие к влаге дисперсии полимеров. Нетоксичные и водостойкие кремнийорганические смолы используются нечасто [15], ввиду невысокой адгезионной прочности, поэтому перспективными являются исследования свойств ОВП на основе силиконов.

5. Методы исследования

5.1. Планирование эксперимента

За основной экспериментальный состав образцов материала ОВП выбрана композиция [13–18], массовое содержание компонентов в которой варьируется в следующем диапазоне:

- кремнийорганическая смола с катализатором – 30 % по массе ОВП;
- мелкодисперсные наполнители (МДН) – 70 % по массе ОВП;
- полифосфат аммония – 65±5 % от массы МДН;
- пентаэритрит и меламина в соотношении 3:2 – 25±5 % от массы МДН;
- гидроксид магния и алюминия в соотношении 1:1–10±5% от массы МДН.

Для изготовления образцов материала огнестойкого покрытия выполнено планирование эксперимента с тремя переменными параметрами:

- x_1 – содержание полифосфата аммония $(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$ при $n > 1000$;
- x_2 – содержание пентаэритрита $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$ и меламина $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$ в соотношении 3:2;
- x_3 – содержание гидроксидов магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ в соотношении 1:1.

План-матрицы эксперимента приведен в табл. 1.

Таблица 1

План-матрица эксперимента для определения оптимального состава огнестойкого вспучивающегося покрытия

№ опытного состава ОВП	Содержание полифосфата аммония $(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$, %	Содержание пентаэритрита $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$ и меламин $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$ (3:2), %	Содержание гидроксидов магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ (1:1), %
1.1	65	30	5
1.2		27,5	7,5
1.3		25	10
2.1	60	32,5	7,5
2.2		30	10
2.3		27,5	12,5
3.1	55	35	10
3.2		32,5	12,5
3.3		30	15

5.2. Методика определения огнезащитных свойств покрытий

Экспериментальные образцы представляли собой стальные пластины размером $0,25 \times 150 \times 150$ мм с нанесенным ОВП толщиной 1 мм (рис. 1).



Рис. 1. Образец огнезащитного покрытия

Испытания всех образцов ОВП выполнялись при следующих условиях:

- в качестве постоянного источника пламени (температуры) использовалась газовая горелка мощностью 1,9 кВт и температурой пламени до 1350°C ;
- экспериментальный образец ОВП совместно с жаростойкой стеклотканью толщиной 4 мм и стальной пластиной толщиной 0,25 мм с габаритными размерами 150×150 мм собирался в пакет. По центру жаростойкой стеклоткани и стальной пластины выполнен квадратный вырез 70×70 мм, который создает проем для доступа открытого пламени. На экспериментальные образцы ОВП накладывался слой жаростойкой стеклоткани и накрывался стальной пластиной (рис. 2). Скомплектованный таким образом пакет, совместно с блоком измерения температуры жестко закреплялся в кондукторе по контуру пакета и в вертикальном положении устанавливался в лабораторный штатив;
- блок измерения температуры (рис. 3) представлял собой розетку из 5-ти термоэлектрических датчиков 3 (ТХК), размещенных со стороны не подверженной воздействию пламени.

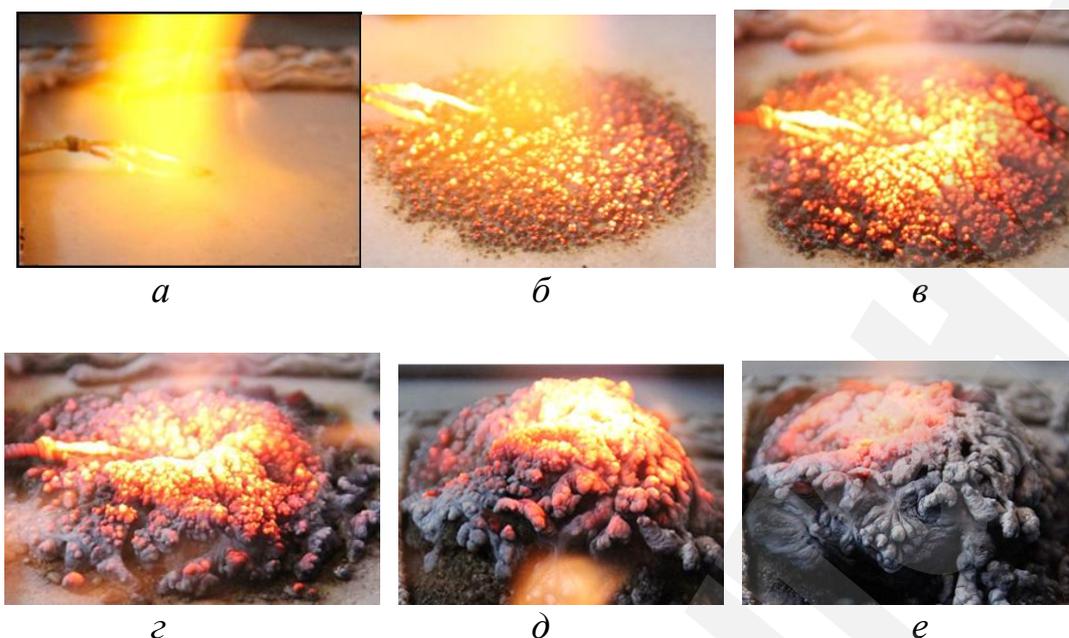


Рис. 4. Изменение поверхности образцов с огнестойким вспучивающимся покрытием при воздействии пламени за время τ при температуре на обратной стороне поверхности T :

$a - \tau=5$ сек; $T=26,3$ °С; $б - \tau=50$ сек; $T=60,2$ °С;
 $в - \tau=300$ сек; $T=110,3$ °С; $г - \tau=450$ сек; $T=127$ °С;
 $д - \tau=780$ сек; $T=135$ °С; $е - \tau = 900$ сек; $T = 142$ °С

В ходе опытов установлено изменение толщины (рис. 5) и коэффициент вспучивания ОВП (относительное увеличение толщины), который рассчитывался по формуле:

$$K = \frac{t_k}{t_n}, \quad (1)$$

где t_k – толщина ОВП после опытов, мм; t_n – толщина ОВП до опытов, мм.

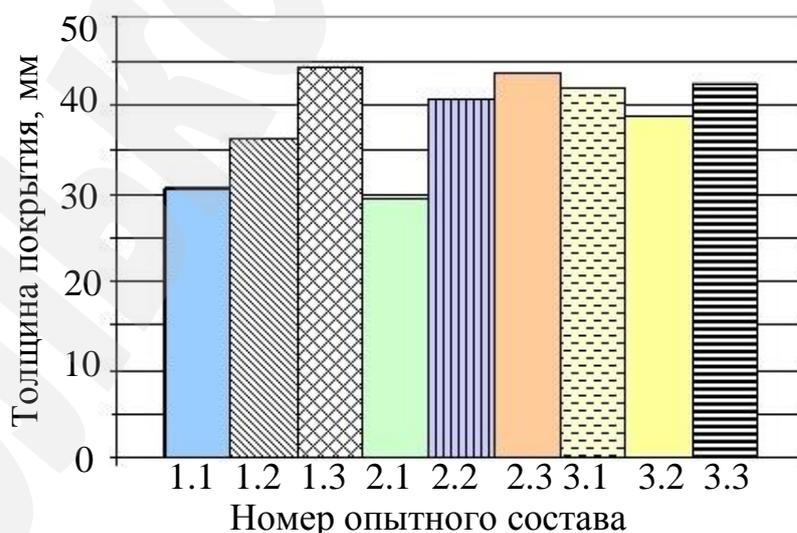


Рис. 5. Толщина огнестойкого покрытия различных составов после опытов

Среднее значение коэффициента вспучивания ОВП для исследуемых партий образцов находится в диапазоне 29–52 (табл. 2) и несущественно зависит от состава.

Таблица 2

Коэффициент вспучивания для различных составов

№ опытного состава	Коэффициент вспучивания
1.1	29,1
1.2	38,9
1.3	42,2
2.1	31,2
2.2	39,2
2.3	38,4
3.1	51,9
3.2	39,2
3.3	46,6

Испытания выполнены для 9-и различных составов ОВП (табл. 1) по 5-и образцам каждого состава. Проведена статистическая обработка результатов экспериментов. В качестве основной функции отклика принята температура (°C) на обратной стороне экспериментальных образцов. Осредненные значения температур для каждого состава представлены на рис. 6.

Для определения оптимального состава ОВП эмпирическая функция отклика $T_{\text{эмп}}$ аппроксимирована линейной зависимостью относительно содержания компонентов наполнителя (параметры варьирования) и дополнена произведением факторов:

$$T_{\text{эмп}}(b_0, b_1, b_2, b_{12}, x_1, x_2) = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (2)$$

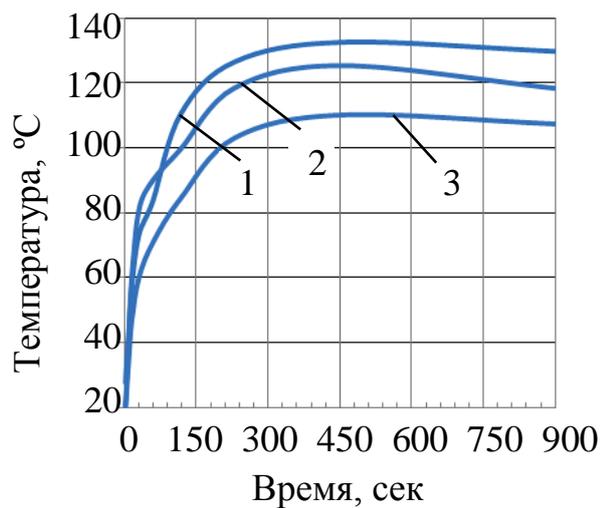
где b_0, b_1, b_2, b_{12} – неизвестные эмпирические коэффициенты; x_1 – относительное содержание полифосфата аммония; x_2 – относительное содержание пентаэритрита и меламина в соотношении 3:2.

За целевую функцию D принята сумма квадратов отклонений эмпирической функции отклика $T_{\text{эмп},i}$ от среднего значения температуры в опытах $T_{\text{экс},i}$ для каждого i -го экспериментального состава ОП:

$$D(b_0, b_1, b_2, b_{12}, x_1, x_2) = \sum_{i=1}^9 (T_{\text{эмп},i}(b_0 \dots x_2) - T_{\text{экс},i}(b_0 \dots x_2))^2. \quad (3)$$

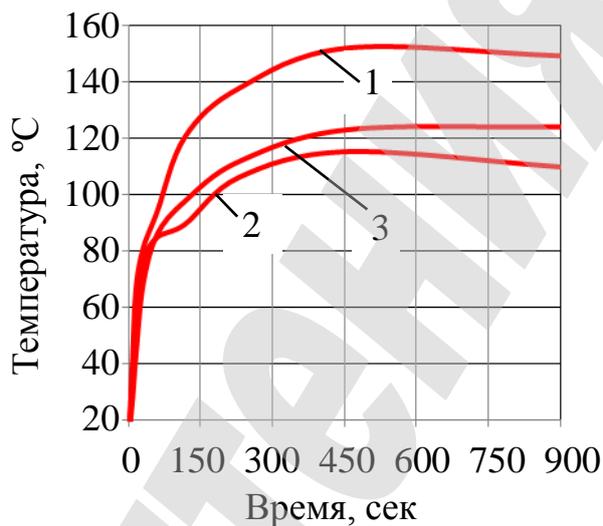
Минимизация целевой функции D выполнена при помощи стандартной функции Minimize в программе MathCAD 14.

В результате минимизации получены значения эмпирических коэффициентов для (2): $b_0=535$; $b_1=-845$; $b_2=-1624$; $b_{12}=3275$.



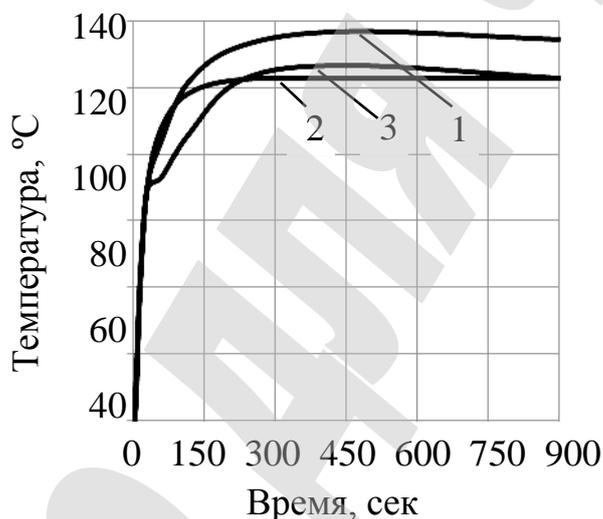
1 – Состав 1.1; 2 – Состав 1.2;
3 – Состав 1.3;

a



1 – Состав 2.1; 2 – Состав 2.2;
3 – Состав 2.3;

б



1 – Состав 3.1; 2 – Состав 3.2;
3 – Состав 3.3;

в

Рис. 6. Зависимость изменения температуры на обратной поверхности образца от времени: *a* – 1 состав; *б* – 2 состав; *в* – 3 состав

Коэффициент корреляции между значением, рассчитанным по эмпирической формуле (2) и значением температуры в опытах, составляет $K(T_{\text{эмп}}, T_{\text{экс}}) = 0,966$. График функции отклика $T_{\text{эмп}}(b_0, b_1, b_2, b_{12}, x_1, x_2)$ представлен на рис. 7.

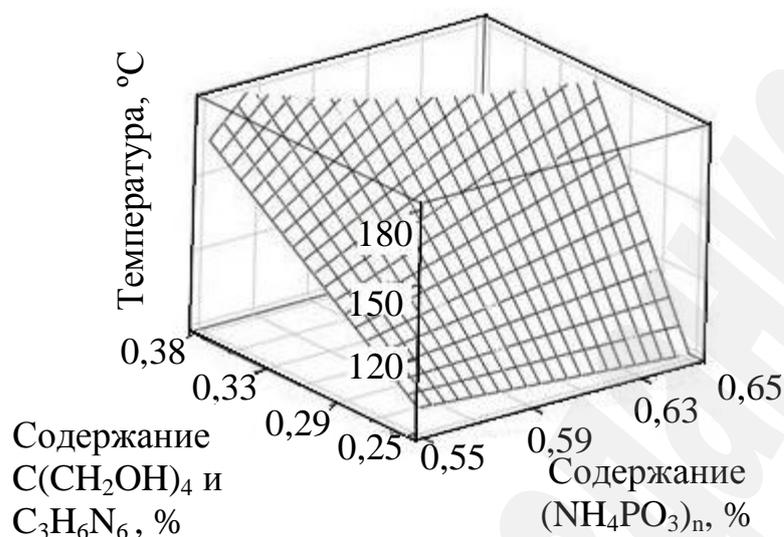


Рис. 7. Зависимость температуры на обратной стороне пластины от состава композиции

Экспериментальные составы ОВП показали хорошие огнезащитные свойства. Температура на обратной стороне образцов при испытаниях в среднем не превышала $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, что значительно ниже температуры деструкции полимерной изоляции электрических проводов.

Предложенный простой способ испытаний позволяет дать сравнительную оценку эксплуатационных характеристик ОВП. Впервые 3–4 минуты воздействия открытого пламени поверхностные слои ОВП вспенивались, а температура обратной стороны образцов разных экспериментальных составов стабилизировалась на уровне $110\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отмечено снижение температуры с обратной стороны образцов при увеличении содержания полифосфата аммония (и соответственно снижении содержания пентаэритрита и меламина), что объясняется увеличением образования фосфорных кислот, выполняющих роль антипиренов. В тоже время, снижение содержания углеродсодержащих компонентов приводило к ухудшению структуры пенококса.

Гидроксиды алюминия и магния активно отводят тепло в начальный момент нагрева ОВП при $190\text{--}270\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако не дают значительного эффекта вспучивания. Их содержание в составе не должно превышать 10% .

По результатам экспериментальных исследований огнестойкости ОВП получена зависимость вида:

$$T(x_1, x_2) = (5,35 - 8,45 \cdot x_1 - 16,24 \cdot x_2 + 32,75 \cdot x_1 \cdot x_2) \cdot 100\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (4)$$

которая адекватно отражает функциональную зависимость температуры на обратной стороне образцов от содержания компонентов. Коэффициент корреляции между эмпирической зависимостью (4) и результатами испытаний образцов ОВП составил $0,966$, что позволило определить оптимальную рецептуру композиции.

Перспективный состав ОВП содержит: полифосфат аммония – $65 \pm 2\%$; пентаэритрит – $15 \pm 2\%$; меламин – $10 \pm 2\%$; гидроксиды магния и алюминия –

по 5 ± 1 % от массы мелкодисперсных наполнителей, который в целом удовлетворяет требованиям по огнестойкости и токсичности.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Среди сильных сторон данного исследования необходимо отметить использование при проведении опытов на огнестойкость открытого пламени газовой горелки, по сравнению с традиционными испытаниями в термошкафе, что больше соответствует условиям реального пожара. В пользу этого утверждения свидетельствует тот факт, что лабораторные испытания в термошкафах не могут воссоздать условия пожара, о чем свидетельствует анализ современной мировой научной периодики по проблемам огнезащиты. Более надежные результаты испытаний можно получить по ИЕС 60332-3-10:2000, когда испытания проводятся в испытательных камерах, оснащенных газовыми горелками.

В опытах исследовались свойства ОВП, при использовании относительно оптимальных диапазонов изменения концентрации компонентов ОВП, что позволило решить задачу выбора рациональной композиции.

Критериями выбора оптимального состава ОВП были, с одной стороны, температура на обратной стороне образцов, с другой – структура образующегося пенококка.

Weaknesses. Слабые стороны данного исследования связаны с тем обстоятельством, что температура пламени газовой горелки в течении опытов не была постоянной, в виду снижения потока газа при расходе газового запорочного картриджа. Поэтому приходилось регулировать подачу газа в ручном режиме. Иными словами, возрастает роль субъективного фактора при строгом воспроизведении условий эксперимента для различных опытных составов ОВП.

Вместе с тем, хорошо известно, что при значительных перепадах температур на лицевой стороне покрытия, термохимические реакции между компонентами покрытия могут проходить по разным механизмам, что в свою очередь может повлиять на характеристики ОВП. В результате этого возникает погрешность в определении реальной зависимости между концентрациями компонентов ОВП и огнезащитными свойствами.

Opportunities. Дальнейшие исследования могут развиваться в направлении модификации кремнийорганической основы для повышения адгезионных свойств ОВП, изучения взаимодействия между его компонентами и оптимизации рецептуры, с учетом введения в состав тугоплавких наполнителей, диспергирующих и пластифицирующих добавок.

Threats. Сложности во внедрении полученных результатов исследования связаны с двумя основными факторами.

Первый из них – в экспериментах по определению оптимального состава ОВП использовалась только одна марка кремнийорганической смолы. Хорошо известно, что механические и адгезионные свойства кремнийорганических смол могут изменяться в широком диапазоне. Поэтому, результаты, полученные в настоящем исследовании, не могут автоматически распространяться на все ОВП с кремнийорганическими связующими.

Второй фактор – кремнийорганические смолы являются более дорогими, по сравнению с традиционными эпоксидными и фенолоформальдегидными

смолами. Применение ОВП с кремнийорганическими связующими может быть оправдано для защиты объектов с повышенным уровнем пожарной опасности.

Таким образом, SWOT-анализ результатов исследований позволяет обозначить основные направления для успешного достижения цели исследований. Среди них:

1. Модификация существующих кремнийорганических смол с целью повышения адгезионных свойств ОВП к защищаемой поверхности.

2. Усовершенствование предложенной методики испытаний покрытий на огнестойкость, которая позволит стабильно поддерживать условия огневого воздействия (температуру и поток газа) в течение всего опыта.

8. Выводы

1. Определено влияние состава ОВП на основе кремнийорганической смолы на огнезащитные свойства покрытия, которые оценивались по температуре на обратной стороне образца. Установлено, что увеличение содержания полифосфата аммония с 55 до 65 % позволяет снизить температуру на обратной стороне образца с 150 до 110 °С.

2. Удалось снизить токсичность газов, образующихся при воздействии открытого пламени на ОВП до предельно допустимых концентраций по содержанию хлора 0,1 мг/м³, оксида углерода (II) 0,08–0,12 мг/л, цианистого водорода 0,3 мг/м³. Это было достигнуто за счет применения кремнийорганической смолы, которая не содержит в своем составе хлора и азота, в качестве связующего в композиции ОВП.

Литература

1. Tsapko, Yu. V. Osnovni tendentsii stvorennia vohnezakhysnykh spuchuiuchykh kompozytsii dlia budivelnykh konstruksii [Text] / Yu. V. Tsapko, A. V. Kravchenko, P. V. Kryvenko, M. V. Nikolaienko // Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury. – 2016. – Vol. 65. – P. 142–147.

2. Krasheninnikova, M. V. Tendentsii i perspektivy razrobotki kompozitsii vspuchivaiushchisia ognezashchitnykh pokrytii dlia povysheniia predelov ognestoikosti stroitel'nykh konstruksii [Text] / M. V. Krasheninnikova // Pozharo-vzryvobezopasnost'. – 2008. – No. 2. – P. 36–39.

3. Krivenko, P. V. Fireproof Coatings on the Basis of Alkaline Aluminium Silicate Systems [Text] / P. V. Krivenko, Y. K. Pushkareva, M. V. Sukhanevich, S. G. Guziy // Ceramic Engineering and Science Proceedings. – 2009. – Vol. 29, No. 10. – P. 129–142. doi:[10.1002/9780470456200.ch13](https://doi.org/10.1002/9780470456200.ch13)

4. Krivenko, P. Protection of Timber from Combustion and Burning Using Alkaline Aluminosilicate-Based Coatings [Text] / P. Krivenko, S. Guzii, A. Kravchenko // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 688. – P. 3–9. doi:[10.4028/www.scientific.net/amr.688.3](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.688.3)

5. Eremina, T. Yu. Purpose and Benefits of Using Fire Retardant Intumescent Compositions Based on Epoxy Resins [Text] / T. Yu. Eremina, M. V. Gravit, Yu. N. Dmitrieva // Fire and Explosion Safety. – 2012. – Vol. 21. No. 8. – P. 42–46.

6. Nenakhov, S. A. Effect of Concentration of Gas-Generating Agent on Regularities of Development Fireproofing Foamed Cokes [Text] / S. A. Nenakhov, V. P. Pimenova // Fire and Explosion Safety. – 2010. – Vol. 19, No. 3. – P. 14–26.

7. Kryvenko, P. Determination of the effect of fillers on the intumescent ability of the organic-inorganic coatings of building constructions [Text] / P. Kryvenko, Y. Tsapko, S. Guzii, A. Kravchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 5, No. 10 (83). – P. 26–31. doi:[10.15587/1729-4061.2016.79869](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79869)

8. Schartel, B. Some comments on the main fire retardancy mechanisms in polymer nanocomposites [Text] / B. Schartel, M. Bartholmai, U. Knoll // *Polymers for Advanced Technologies*. – 2006. – Vol. 17, No. 9–10. – P. 772–777. doi:[10.1002/pat.792](https://doi.org/10.1002/pat.792)
9. Nenakhov, S. A. Physico-Chemical Foaming Fire-Retardant Coatings Based on Ammonium Polyphosphate (Review of the Literature) [Text] / S. A. Nenakhov, V. P. Pimenova // *Fire and Explosion Safety*. – 2010. – Vol. 19, No. 8. – P. 11–58.
10. Cirpici, B. K. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire [Text] / B. K. Cirpici, Y. C. Wang, B. Rogers // *Fire Safety Journal*. – 2016. – Vol. 81. – P. 74–84. doi:[10.1016/j.firesaf.2016.01.011](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011)
11. Fan, F. Effects of inorganic fillers on the shear viscosity and fire retardant performance of waterborne intumescent coatings [Text] / F. Fan, Z. Xia, Q. Li, Z. Li // *Progress in Organic Coatings*. – 2013. – Vol. 76, No. 5. – P. 844–851. doi:[10.1016/j.porgcoat.2013.02.002](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.02.002)
12. Le Bras, M. Fire Retardancy of Polymers [Text] / ed. by M. Le Bras, S. Bourbigot, S. Duquesne, C. Jama, C. Wilkie. – Royal Society of Chemistry, 2007. – 416 p. doi:[10.1039/9781847552396](https://doi.org/10.1039/9781847552396)
13. Weather-resistant and fire-proof nanometer coating for expanding ultrathin steel structure and production thereof [Electronic resource]: Patent CN 1680501 A / Wang Zhenyu, Han Enhou, Ke Wei; assignee: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences. – Appl. No. CN 200410021264; Filed April 9, 2004; Published October 12, 2005. – Available at: \www/URL: <https://www.google.com/patents/CN1680501A?cl=en>
14. Fire-retardant paint with steel structure [Electronic resource]: Patent CN 101857756 A / Shang Zhenguo, Zhang Yongjun, Li Feiyun, Wang Zhe, Wang Xiaomei, Wang Jingbo, Zhiteng Ming, Su Zhongjie, Xie Chenggang, Hao Lin, Han Ping, Ma Zheng, Gao Liang; assignee: Inner Mongolia Xingtai Construction Co., Ltd. – Appl. No. CN 201010221161; Filed July 8, 2010; Published October 13, 2010. – Available at: \www/URL: <https://www.google.com/patents/CN101857756A?cl=en>
15. Ognestoikii sostav [Electronic resource]: Patent RU 2148605 / Riabov S. V., Matveev S. A. – Appl. No. 99104530/04; Filed March 9, 1999; Published May 10, 2000. – Available at: \www/URL: <http://ru-patent.info/21/45-49/2148605.html>
16. Method of producing vibration- and noise-attenuating fire-retardant composition [Electronic resource]: Patent RU 2470966 C2 / Ponimatkin V. P., Chernova N. S., Mnatsakanov S. S., Zybina O. A., Zav'jalov D. E.; assignee: Obshchestvo s ograniche nnoj otvetstvennost'ju «FAKTORIJa LS». – Appl. No. 2011113427/05; Filed April 8, 2011; Published December 27, 2012. – Available at: \www/URL: <http://www.freepatent.ru/images/patents/147/2470966/patent-2470966.pdf>
17. Ognезashchitnaia vspuchivaiushchiasia kraska [Electronic resource]: Patent RU 2224775 C1 / Zahvatkin S. S., Fasiura V. N., Vladislavleva E. Yu. – Appl. No. 2003110927/04; Filed April 17, 2003; Published February 27, 2004. – Available at: \www/URL: <http://bd.patent.su/2224000-2224999/pat/servlet/servletbfae.html>
18. Fire-resistant coating material adina [Electronic resource]: Patent UA 110236 C2 / Magdina R., Nemecek L. – Appl. No. a201311315; Filed February 7, 2012; Published December 10, 2015. – Available at: \www/URL: <http://uapatents.com/6-110236-vognestijjkijj-material-dlya-pokrittiv-adina.html>