

Ю.В. Цапко<sup>1</sup>, О.Ю. Цапко<sup>1, 2</sup>, О.П. Бондаренко<sup>2</sup>, З.С. Сірко<sup>1</sup>, К.О. Каверин<sup>2</sup>,  
Д.Ю. Семігран<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс", Україна

<sup>2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ВОГНЕЗАХИСНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІНТУМЕСЦЕНТНИМ ПОКРИТТЯМ

**Анотація.** Наведено дослідження по створенню вогнезахисних інтумесцентних покриттів, які здатні забезпечити широкий спектр вогнезахисних та експлуатаційних властивостей деревини. Після випробувань зразків, оброблених інтумесцентним покриттям, за дії полум'я пальника отримано втрату маси зразка не більше 6% та температуру димових газів не вище 184°C, що переводить оброблену деревину до групи важкогорючих матеріалів.

**Ключові слова:** будівельні конструкції, вогнезахисне оброблення, підприємства держрезерву, інтумесцентні покриття, вогнезахисні властивості, ефективність.

### Постановка проблеми

Деревина широко використовується для зведення дахів та є основним джерелом розповсюдження полум'я поверхнею й потребує вогнезахисту. Вимоги до якості вогнезахисту дерев'яних конструкцій регламентовані [1, 2]. Існує чимало способів вогнезахисної обробки деревини антипіренами. Серед них просочування деревини неорганічними солями та нанесення покриттів на органічній основі. Зазначені способи мають недоліки під час нанесення та експлуатації дерев'яних конструкцій: при впливі вологи на деревину під дією зовнішніх факторів солі розчиняються та поступово вимиваються, мають підвищене димоутворювання та виділення токсичних продуктів при горінні, під атмосферним впливом втрачають адгезійну властивість [3]. Тому актуальним є проведення досліджень та створення вогнезахисного інтумесцентного покриття, яке буде забезпечувати широкий спектр вогнезахисних та експлуатаційних властивостей, витримувати дію навколишнього середовища без порушення цілісності покриття. Це зумовить підвищення довговічності виробів із урахуванням сучасних вимог щодо охорони навколишнього середовища.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

В роботі [4] встановлено, що сучасні засоби вогнезахисту являють собою суміші, як органічних так і неорганічних речовин, що характеризуються здатністю утворювати на поверхні підложки спучений шар пінококсу. Але, не встановлено, як дані покриття експлуатуються та чи є

атмосферостійкими. Ефективність дії таких вогнезахисних засобів на основі органо-неорганічних композицій показана в роботі [5]. Так, за рахунок розкладу антипіренів з поліфосфорних кислот і спінювачів можливо регулювати формування захисного шару пінококсу. Проте, такі композиції під час експлуатації вимиваються, так як виготовлені на водній основі.

Опис роботи спучуючих покриттів є однією із завдань, що потребує ув'язки експериментальних даних з наявними теоретичними залежностями, що показано в роботі [6]. Проте, залишилися невирішеними проблеми, які пов'язані з атмосферостійкістю даних покриттів при коливаннях в зовнішніх умовах.

В роботі [7] розглянуто математичну модель при зміні температурно-вологісних коливань вогнезахисного покриття, що розроблена на законах збереження матеріалу й енергії. Тут передбачається певний вид функціональних залежностей теплофізичних характеристик з набором невстановлених коефіцієнтів і задача зводиться до чисельного визначення цих коефіцієнтів, що пов'язано з високою неточністю.

Ефективність застосування речовин покриття, основою яких є органічні речовини показано в роботі [8], де за рахунок термічної дії на антипірени можливо впливати на спучення захисного шару пінококсу. Проте, виникає необхідність у дослідженні умов створення перешкоди для теплопровідності та встановлення ефективності покриття щодо утворення захисного шару.

Значний рівень стійкості, щільності та міцності спученого шару коксу досягається при формуванні

покриття та введенні добавок, які утворюються завдяки високотемпературним сполукам [9]. Але, для доказу цього факту не представлені відповідні фізико-хімічні результати, що мають місце при експлуатації.

Вплив мінеральних речовин на властивості водного вогнезахисного покриття показало свою ефективність [10], однак, механізм взаємодії при спученні покриття при термічній дії не зазначений та не встановлені умови його експлуатації. В роботі приведена модель, як вогнестійкості так і термічної деградації пінококсу, яка враховує структуру пор, але дана модель не доводить, які перетворення у покритті відбуваються при експлуатації при підвищеній вологості середовища [11].

В роботі [12] висунуто математичну основу та методичку чисельного визначення кінетики стану, як тепла так і вологості спученого шару пінококсу та підложки, що побудована на вирішенні рівняння теплопровідності та передачі вологи. Проте, дані дослідження притаманні тільки для неорганічного матеріалу і застосувати їх для деревини неможливо.

Таким чином, в результаті аналізу літературних джерел встановлено, що вогнезахисні покриття здатні деградувати з поверхні дерев'яних виробів при експлуатації. Параметри, що забезпечують стійкість до втрати ефективності вогнезахисту не встановлені. Тому, встановлення параметрів гальмування виходу вогнезахисних композицій з деревини та впливу речовин, які входять до їх композицій, і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

### Мета роботи

Розробити інтумесцентне покриття для захисту деревини від вогневого впливу та на основі вогнезахисної ефективності встановити його оптимальний склад.

### Виклад основного матеріалу

Щоб отримати спучувальну здатність інтумесцентного покриття, потрібно експериментально визначити величину спучення (висоту спіненого шару покриття), вогнезахисної ефективності, а також механізму захисту покриття від високотемпературного впливу. Для досліджень використовували хімічні компоненти (в'язучі, систему антипіренів, пігменти, наповнювачі та функціональні добавки), які є складовими покриття, а також встановлювали властивості покриття, визначали механічну та термічну стійкість спіненого шару покриття до теплового впливу за рахунок введення тугоплавких оксидів. Спучувальну здатність інтумесцентного покриття визначали за допомогою приладу визначення кінетики спучування вогнезахисного покриття. Вогнезахисну

ефективність покриття визначали за допомогою установки ОТМ.

В процесі досліджень визначали раціональний склад органічної складової композиції інтумесцентного органо-мінерального покриття. Був застосований трьохфакторний симплекс-центральный метод планування експерименту. Визначені раціональні органічні складові за витрати основного в'язучого агента – полівінілацетатної дисперсії у кількості 14, 16 і 18 мас. %. Були вибрані наступні фактори варіювання: кількість поліфосфату амонію (ПФА), % (фактор  $X_1$ ); кількість пентаерітриту (П), % (фактор  $X_2$ ) і кількість меламіну (М), % (фактор  $X_3$ ). За вихідний параметр обрали коефіцієнт спучення, значення якого фіксували на зразках деревини, які були термооброблені за температури 500°C. Фактори варіювання наведені у Таблиці 1.

Аналіз отриманих рівнянь регресії показав, що варійовані фактори взаємопов'язані та досить значимі. Суттєвий вплив на коефіцієнт спучення за витрати полівінілацетатної дисперсії у кількості 14% має взаємна дія факторів  $X_2X_3$  і  $X_1X_2X_3$ ; за витрати полівінілацетатної дисперсії у кількості 16% – взаємна дія факторів  $X_1X_3$ ,  $X_2X_3$  та  $X_1X_2X_3$ ; за витрати полівінілацетатної дисперсії у кількості 18% – взаємна дія факторів  $X_1X_3$  та  $X_2X_3$ .

Таблиця 1  
Фактори варіювання складових покриття

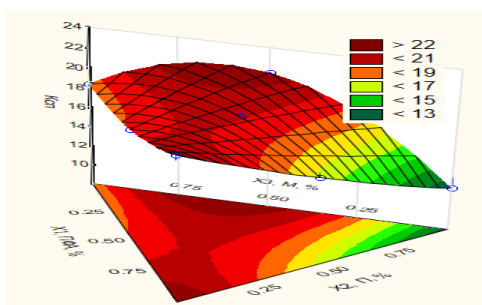
| Фактори            |                | Вибрані рівні варіювання |                  | Інтервал варіювання |
|--------------------|----------------|--------------------------|------------------|---------------------|
| Натуральний вигляд | Кодовий вигляд | Нижній рівень 0          | Верхній рівень 1 |                     |
| ПФА, %             | $X_1$          | 15,0                     | 20,0             | 5                   |
| П, %               | $X_2$          | 8,0                      | 14,0             | 6                   |
| М, %               | $X_3$          | 10,0                     | 16,0             | 6                   |

Визначено, що при введенні мінеральних наповнювачів до складу органо-мінеральної композиції в кількості 10% сприяє підвищенню коефіцієнта спучення від 30 до 36,7, що в 1,5...1,84 рази більше від значення коефіцієнта спучення органо-мінеральної композиції оптимального складу без наповнювачів. У результаті моделювання отримані рівняння регресії та побудовані тернарні поверхні змін вихідного параметру в залежності від змін факторів варіювання (рис. 1).

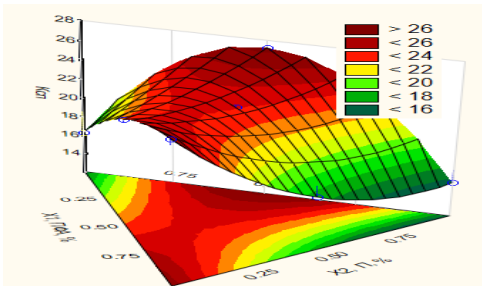
Із рис. 1 видно, що збільшення коефіцієнта спучення від 14,3 до 25,1 відбувається одночасно із збільшенням у складі композиції поліфосфату амонію від 16,5 до 20% ( $X_1$ ) та меламіну від 10,5 до 15,5% ( $X_2$ ) при зменшенні пентаерітриту від 11,5 до 8,0% ( $X_3$ ).

Для випробувань з визначення групи вогнезахисної ефективності готували зразки розміром 150x60x30 мм з деревини сосни. Зразки

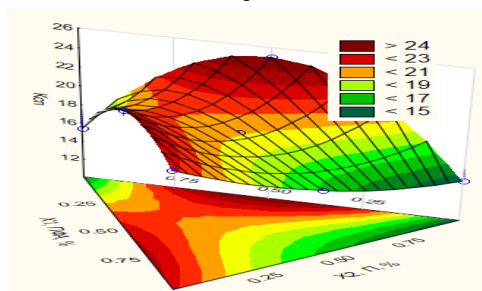
піддавалися кондиціюванню при температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Всю поверхню зразків у відповідності із регламентом робіт з вогнезахисту обробляли інтумесцентним покриттям у два шари з проміжним сушінням через 3 години.



а



б



в

Рис. 1. Зміна коефіцієнтів спучення  $K_{сп}$  органічної складової вогнезахисної композиції при витраті ПВА-дисперсії, %: а – 14; б – 16; в – 18.

Математична реалізація матриці експерименту наведена у Таблиці 2.

Таблиця 2

Математична реалізація матриці експерименту

| Точки плану експерименту | Кодовані значення |       |       | Натуральні значення |      |      | Функція відгуку |          |          |
|--------------------------|-------------------|-------|-------|---------------------|------|------|-----------------|----------|----------|
|                          | $X_1$             | $X_2$ | $X_3$ | ПФА, %              | П, % | М, % | $K_{сп}$        | $K_{сп}$ | $K_{сп}$ |
| 1                        | 0,0               | 1,0   | 0,0   | 15,0                | 14,1 | 10,0 | 10,4            | 15,8     | 14,4     |
| 2                        | 0,3               | 0,3   | 0,3   | 16,8                | 10,0 | 12,2 | 18,7            | 24,2     | 20,2     |
| 3                        | 1,0               | 0,0   | 0,0   | 20,1                | 8,0  | 10,0 | 27,8            | 26,7     | 22,4     |
| 4                        | 0,5               | 0,5   | 0,0   | 17,6                | 11,0 | 10,0 | 18,3            | 17,8     | 16,7     |
| 5                        | 0,0               | 0,0   | 1,0   | 15,0                | 8,0  | 16,2 | 14,8            | 16,4     | 15,5     |
| 6                        | 0,5               | 0,0   | 0,5   | 17,6                | 8,0  | 13,0 | 21,7            | 23,3     | 22,8     |
| 7                        | 0,0               | 0,5   | 0,5   | 15,0                | 11,0 | 13,0 | 24,7            | 27,4     | 25,2     |
| Вміст ПВА-дисперсії, %   |                   |       |       |                     |      |      | 14              | 16       | 18       |

Після повного висихання зразків протягом не менше одного тижня їх піддавали вогневим випробуванням згідно з [2] на установці ОТМ. Спосіб кріплення зразка в установці показаний на рисунку 2.



Рис. 2. Спосіб кріплення зразка в установці ОТМ.

Вогневий вплив на оброблений зразок проводили протягом двох хвилин пальником в установці. Після випробувань зовнішній вигляд зразка та стан інтумесцентного покриття показані на рисунку 3.



Рис. 3. Зовнішній вигляд зразка та інтумесцентного покриття після випробувань.

В результаті випробувань встановлено, що під температурним впливом полум'я пальника відбулося спучення покриття (товщина спучення складала 27 мм). При цьому втрата маси зразка складала менше 6%. Температура димових газів під час випробувань не перевищувала  $184^\circ\text{C}$ .

Таким чином, інтумесцентне покриття забезпечує першу групу вогнезахисної ефективності згідно з [2].

### Висновки

Запропоновано складові частини інтумесцентного покриття та визначено їх ефективність щодо вогнезахисту деревини. Залежно від вмісту ПВА-дисперсії визначено зміну коефіцієнту спучення, що знаходиться в межах від 14,3 до 25,1. Після випробувань зразків, оброблених інтумесцентним покриттям, за дії полум'я пальника отримано втрату маси зразка не більше 6% та температуру димових газів не вище  $184^\circ\text{C}$ , що переводить оброблену деревину до групи важкогорючих матеріалів.

## Література

1. ДБН В 1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів. Загальні вимоги. Київ, 2017. 20 с.
2. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Київ, 2020. 20 с.
3. Цапко Ю.В., Ломага В.В., Цапко О.Ю. Вогнезахист деревини органо-неорганічними композиціями: Монографія. Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2023. 160 с.
4. Khalili P., Tshai K.Y., Hui D., Kong I. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy comp. *Composites Part B: Engineering*, 2017. Vol. 114. P. 101-110. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.049.
5. Krüger S., Gregor J., Gluth G., Watolla M.-B., Morys M., Häßler D., Scharrel B. Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen. Berlin, Bautechnik, 2016. Vol. 93/8. P. 531-542. DOI: 10.1002/bate.201600032.
6. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O. Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, 2019. Vol. 1.No 10 (97). P. 36-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644.
7. Janetti M.B., Wagner P. Analytical model for the moisture absorption in capillary active building materials. *Building and Environment*, 2017. Vol. 126. P. 98-106.
8. Ciripi B.K., Wang Y.C., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 2016. Vol. 81. P. 74-84. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.01.011.
9. Carosio F., Alongi J. Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds. In: *Acs applied materials & Interfaces*. *Electronico*, 2016. Vol. 8:10. P. 6315-6319. DOI: 10.1021/acsami.6b00598.
10. Nasir K., Ramli Sulong N.H., Johan M.R., Afifi A.M. An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application. *Pigment & Resin Technology*, 2018. Vol. 47. Issue 2. P. 42-153. DOI: 10.1108/PRT-09-2016-0089.
11. Zhao P., Guo C., Li L. Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018. P. 1-9. DOI: 10.1007/s10973-018-7544-9.
12. Kovalnogov V.N., Karpukhina T.V., Korotkov E.A. Mathematic modeling of the kinetics of heat-and-humidity state of capillary-porous bodies under convection drying. *AIP Conference Proceedings*, 2016. Vol. 1738. 480005. <https://doi.org/10.1063/1.4952241>.

## References

1. DBN V 1.1-7:2016 (2017). *Pozhezhna bezpeka obyektiv. Zagalni vymogy*. Kyiv.
2. DSTU 8829:2019 (2020). *Pozhezhovybukhonebezpechnist' rehovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennya. Klyasyfikatsiya*. Kyiv.
3. Tsapko, Yu.V., Lomaga, V.V., Tsapko, O.Yu. (2023). *Vognexakhyst derevyny organo-neorganichnymy kompozitsiyamy*: Monografiya. Kyiv: FOP Yamchynskii O.V.
4. Khalili, P., Tshai, K.Y., Hui, D., Kong, I. (2017). Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy comp. *Composites Part B: Engineering*, 114, 101-110. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.01.049.
5. Krüger, S., Gregor, J., Gluth, G., Watolla, M.-B., Morys, M., Häßler, D., Scharrel, B. (2016). *Neue Wege: Reaktive*

- Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen*. Berlin, Bautechnik, 93(8), 531-542. doi: 10.1002/bate.201600032.
6. Tsapko, Yu., Tsapko, A., Bondarenko, O. (2019). Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, 1, 10 (97), 36-42. doi: 10.15587/1729-4061.2019.156644.
7. Janetti, M.B., Wagner, P. (2017). Analytical model for the moisture absorption in capillary active building materials. *Building and Environment*, 126, 98-106.
8. Ciripi, B.K., Wang, Y.C., Rogers, B. (2016). Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 81, 74-84. doi: 10.1016/j.firesaf.2016.01.011.
9. Carosio, F., Alongi, J. (2016). Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds. In: *Acs applied materials & Interfaces*. *Electronico*, 8 (10), 6315-6319. doi: 10.1021/acsami.6b00598.
10. Nasir, K., Ramli Sulong, N.H., Johan, M.R., Afifi, A.M. (2018). An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application. *Pigment & Resin Technology*, 47, 2, 42-153. doi: 10.1108/PRT-09-2016-0089.
11. Zhao, P., Guo, C., Li, L. (2018). Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-9. doi: 10.1007/s10973-018-7544-9.
12. Kovalnogov, V.N., Karpukhina, T.V., Korotkov, E.A. (2016). Mathematic modeling of the kinetics of heat-and-humidity state of capillary-porous bodies under convection drying. *AIP Conference Proceedings*, 1738, 480005. <https://doi.org/10.1063/1.4952241>.

**Автор:** ЦАПКО Юрій Володимирович,  
доктор технічних наук, професор,  
начальник відділу науково-організаційної роботи та наукових досліджень,  
Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс",  
Yuriy TSAPKO,  
doctor of technical sciences, professor,  
head of the department of scientific and organizational work and scientific research,  
Ukrainian State Research Institute "Resurs",  
E-mail: [juriyts@ukr.net](mailto:juriyts@ukr.net);  
IDORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0625-0783>

**Автор:** ЦАПКО Олексій Юрійович,  
кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, старший науковий співробітник, начальник відділу науково-технічних розробок, інновацій та енергозбереження,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс",  
Oleksiy TSAPKO,  
PhD, associate professor of the department of building materials, senior researcher, head of the department of scientific and technical developments, innovations and energy saving,  
Kyiv National University of Construction and Architecture,

Ukrainian State Research Institute "Resurs".

E-mail: [alekseysapko@gmail.com](mailto:alekseysapko@gmail.com);

IDORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068x>

**Автор:** БОНДАРЕНКО Ольга Петрівна,  
кандидат технічних наук, доцент кафедри  
будівельних матеріалів,  
Київський національний університет будівництва і  
архітектури,

Olga BONDARENKO,

candidate of technical sciences, associate professor of  
the department of building materials,  
Kyiv National University of Construction and  
Architecture,

E-mail: [bondolya3@gmail.com](mailto:bondolya3@gmail.com);

IDORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8164-6473>

**Автор:** СІРКО Зиновій Степанович,  
кандидат технічних наук, старший науковий  
співробітник,

Український державний науково-дослідний  
інститут "Ресурс",

Zinovii SIRKO,

candidate of technical sciences, senior researcher,  
Ukrainian State Research Institute "Resurs",

E-mail: [z.sirko@ukr.net](mailto:z.sirko@ukr.net);

IDORCID: [orcid.org/0000-0001-5197-9237](http://orcid.org/0000-0001-5197-9237)

**Автор:** КАВЕРИН Костянтин Олександрович,  
кандидат технічних наук, доцент кафедри  
будівельних матеріалів,

Київський національний університет будівництва і  
архітектури,

Kostyantyn KAVERYN,

candidate of technical sciences, associate professor of  
the department of building materials,

Kyiv National University of Construction and  
Architecture,

E-mail: [1krik.1k1@gmail.com](mailto:1krik.1k1@gmail.com);

IDORCID: [orcid.org/0000-0001-9086-5953](http://orcid.org/0000-0001-9086-5953)

**Автор:** СЕМІГРАН Дмитро Юрійович,  
студент будівельно-технологічного факультету,  
Київський національний університет будівництва і  
архітектури,

Dmytro SEMIGRAN,

student of the Faculty of Construction and Technology,

Kyiv National University of Construction and  
Architecture,

E-mail: [dmitriy.semigra@gmail.com](mailto:dmitriy.semigra@gmail.com);

IDORCID: [orcid.org/0009-0008-7740-7585](http://orcid.org/0009-0008-7740-7585)

## FEATURES OF FIRE PROTECTION TREATMENT OF LOAD-BEARING BUILDING STRUCTURES

Yu. Tsapko<sup>1</sup>, O. Tsapko<sup>1,2</sup>, O. Bondarenko<sup>2</sup>, Z. Sirko<sup>1</sup>, K. Kaverin<sup>2</sup>, D. Semigran<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ukrainian State Research Institute "Resurs", Ukraine,

<sup>2</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

The article emphasizes that wood is a flammable material, flames spread quickly, which poses a threat to building structures. Therefore, it must be protected by effective means of fire protection. Regulatory and technical documentation is presented, which establishes requirements for the quality of fire protection of wooden structures. Using the example of state reserve enterprises, it is shown that there are many methods of fire-resistant treatment of wooden structures with flame retardants. Among them are the impregnation of wood with inorganic salts and the application of coatings on an organic basis. These include impregnation of wood with inorganic salts and application of coatings on an organic basis. It is shown that the specified methods of processing have disadvantages during application and operation, which include the moistening of wood under the influence of external natural factors, which leads to the dissolution and leaching of salts, increased smoke formation, and the formation of toxic combustion products. The constituent parts of the intumescent coating are proposed and their effectiveness in relation to fire protection of wood is determined. Depending on the content of PVA-dispersion, a change in the coefficient of swelling was determined, which is in the range from 14.3 to 25.1. Thus, it was determined that when mineral fillers are added to the composition of the organo-mineral composition in the amount of 10%, it helps to increase the coefficient of swelling from 30 to 36.7, which is 1.5...1.84 times greater than the value of the coefficient of swelling of the optimal composition of the organo-mineral composition without fillers. The article presents research on the creation of fire-resistant intumescent coatings capable of providing a wide range of fire-resistant and operational properties. After testing samples treated with an intumescent coating, under the action of a burner flame, a sample weight loss of no more than 6% was obtained, and the temperature of flue gases did not exceed 184°C, which refers the treated wood to the group of non-combustible materials. Thus, the intumescent coating provides the first group of fire protection efficiency.

**Keywords:** building structures, fire-resistant treatment, state reserve enterprises, intumescent coatings, fire-resistant properties, efficiency.