

**Цапко Ю.В., Киричок В.І., Цапко О.Ю., Бондаренко О.П.**

*Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
(Повітрофлотський просп., 31, Київ, 03680; e-mail: juriyts@ukr.net, v.kyrychok@gmail.com,  
alekseytsapko@gmail.com, bondolya3@gmail.com)*

## **АСПЕКТИ РОЗРОБЛЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ПОКРІВЕЛЬНОЇ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ ОЧЕРЕТУ**

В роботі досліджено процеси створення вогнезахисної покрівельної композиції для очерету, яка складається з суміші неорганічних та полімерних речовин. Встановлено, що оптимізація неорганічної складової приводить до направленою співвідношення мінеральних кислот та карбаміду, здатних до ефективного вогнезахисту матеріалу, а додавання крохмалю в кількості 20% утворює на поверхні очерету захисну плівку. При цьому, як свідчать результати термостійкості, відбувається зміна структури захисної плівки покриття: збільшується товщина захисного шару за рахунок розкладу композиції, що призводить до гальмування окислення в газовій і конденсованій фазі, зміною напрямлення розкладу в сторону утворення негорючих газів і важкогорючого коксового залишку, зниження горіння матеріалу та відповідно підвищення індексу горючості. Покриття при дії високої температури сприяє утворенню теплоізолювального шару коксу, що запобігає вигоранню і проходженню високої температури до матеріалу, що і підтверджується відсутністю процесу займання вогнезахисного очерету.

**Ключові слова:** очерет, горючість, органо-неорганічна композиція, вогнезахист, антипірен.

**Вступ.** Зниження пожежної небезпеки будівельних виробів є завданням не лише економічним, а має соціальну та екологічну спрямованість. Важливою проблемою забезпечення життєдіяльності та безпечного функціонування об'єктів будівництва є розроблення, з економічної, технологічної та екологічної точок зору, вогнезахисних засобів для будівельних конструкцій, що можуть використовуватись не тільки нарівні з існуючими аналогами, але і бути високоефективними у спеціальних галузях будівництва, що уможлиблює запобігання виникненню техногенних аварій. В будівництві все більш інтенсивно ведеться пошук нових високоефективних будівельних матеріалів, зокрема, з природної сировини, як очерет. Застосування у будівництві очерету має значну кількість переваг, але потребує захисту від вогню.

На сьогодні існує два способи вогнезахисту будівельних матеріалів. Перший – це просочення антипіренами, частіше за все на основі неорганічних солей [1–3]. Засіб на основі кислот, проникаючи в глибину структури матеріалу і взаємодіючи з клітчаткою, утворює комплекси, які інгібують горіння. Однак, очерет, характеризується значною щільністю та гідрофобністю

і просочення не затримується в матеріалі та стікає з поверхні [4]. Другий засіб – це нанесення на поверхню деревини покриття на органічному чи неорганічному в'язучому. Засіб на органічному в'язучому має підвищене димоутворення і виділення токсичних речовин, тому його використання небезпечне [5, 6]. Найбільш ефективними вважаються вогнезахисні покриття на неорганічному в'язучому, властивості яких вже досліджені [7–9]. Але ці матеріали утворюють на поверхні жорстке покриття, яке змінює колір поверхні та під дією атмосфери втрачає адгезію та осипаються.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є дослідження складових покрівельного засобу для очерету на вогнестійкість, їх оптимізація і встановлення ефективності вогнезахисту обробленого виробу.

**Матеріали і методи досліджень.** Для встановлення вогнезахисної ефективності очерету використовували зразки очерету, які оброблювали різними композиціями, зокрема, водним розчином, що здатен просочити матеріал і після випаровування води, залишити у структурі сухі антипірени, а також покриття, яке утворює на поверхні безбарвну плівку та здатне під дією високої температури створити на поверхні

піно коксовий захисний шар, а саме, покрівельним просочувальним розчином на основі суміші органічних і неорганічних речовин (суміш карбаміду і фосфорних кислот та природного полімеру у різних пропорціях). Отриману масу перемішували, додавали воду 100 % і наносили на зразок очерету (рис. 1), а для дослідження впливу складу сумішей антипіренів знижували їх концентрацію до пропорції 1:1.



Рис. 1. Модельні зразки очерету для випробувань

Для дослідження ефективності вогнезахисного матеріалу використовували зразки очерету середніми розмірами діаметром до 10 мм і висотою 310 мм, які зв'язували у мати розміром 310x140 мм і обробляли покрівельним просочувальним розчином, з витратою 47,1 г/м<sup>2</sup>.

Дослідження з визначення термічної стійкості вогнезахисного очерету проводили за методикою, суть якої полягала у впливі на зразок вогнезахисного очерету радіаційної панелі та його запалювання, вимірюється максимальна температура продуктів горіння та час її досягнення, час займання та проходження фронтом полум'я ділянок поверхні, довжину згорілої частини зразка. Та за отриманими даними розраховується величина безрозмірного індексу горючості за коефіцієнтом  $I$ :

$$I = \sqrt{\frac{q \cdot Q}{W} \cdot \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{но}}} \cdot \frac{\tau_{\max} - \tau_0}{\tau_0} \cdot \left[ 1 + \frac{60 \cdot l_r}{l} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \right]}, \quad (1)$$

де  $q$  – питома теплота згорання газу пропан (23630), кДж·л<sup>-1</sup>;  $Q$  – витрата газу запального пальника (0,001), л·с<sup>-1</sup>;  $W$  – потужність електричної радіаційної панелі, 0,5 кВт;  $\Delta T_{\max}$  – максимального приросту температури димових газів:

$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_0,$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища, °С;  $T_{\max}$  – максимальна температура

димових газів, °С;  $\Delta T_{\text{но}}$  – максимального приросту температури нагрівального обладнання:

$$\Delta T_{\text{но}} = T_1 - T_0,$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища, °С;  $T_1$  – температура вихідного повітря при роботі нагрівального обладнання, °С;  $\tau_0$  – час займання зразка, с;  $\tau_{\max}$  – час досягнення максимальної температури димових газів, с;  $\tau_i$  – час проходження фронтом полум'я контрольних ділянок, с;  $l$  – довжина зразка, мм;  $l_r$  – довжина пошкодження зразка, мм.

На рис. 2 наведено випробувальну камеру для проведення досліджень.

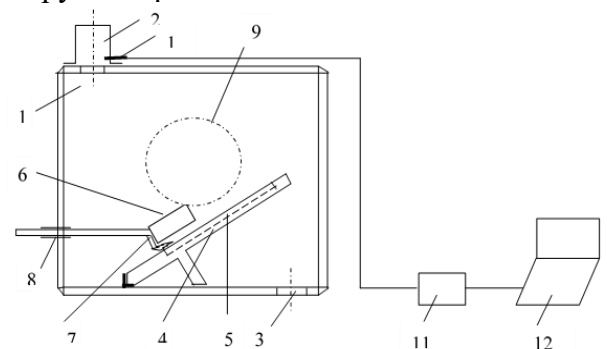


Рис. 2. Випробувальна камера для визначення параметрів займання та поширення полум'я: 1 – випробувальна камера, 2 – витяжна труба, 3 – вентиляційний отвір, 4 – тримач зразка, 5 – зразок, 6 – радіаційна панель, 7 – запальний пристрій, 8 – регульовальна труба, 9 – оглядове скло, 10 – термопара, 11 – аналого-цифровий перетворювач, 12 – комп'ютер

**Результати досліджень.** Виробники вогнезахисних засобів, враховуючи умови ринку, намагаються оптимізувати дані виробу з точки зору вмісту основних компонентів, а точніше антипіренів, в'язучих, загусників і інших складових. Варіації вмісту та концентрації вивчаються та досліджуються також з точки здешевлення покриття, але при цьому отримання гарного ефекту вогнезахисту з необхідними властивостями міцності.

Під час розробки покриття керуються необхідністю одержання ряду властивостей, що визначають у цілому його здатність захищати від дії вогню. До числа таких властивостей відносяться: негорючість покриття, ізолюючі властивості покриття від дії тепла, ізолюючі властивості покриття

від доступу повітря та полум'я від джерела запалювання. Для одержання вогнезахисного покриття, що задовольняє пред'явленим вимогам, необхідно, щоб компоненти, які входять до складу покриття відносились безпосередньо до групи негорючих, важкогорючих матеріалів або утворювали такі з'єднання в умовах нагрівання, та здатні утримуватись на поверхні виробу.

Враховуючи вище наведений механізм дії, за допомогою трьохфакторного симплекс-центрального методу планування експерименту в математичному середовищі Statistica 12, проведено оптимізацію складових вогнезахисної композиції при витраті кислоти, карбаміду та зв'язувального агента – крохмалу.

У якості факторів варіювання були обрані: кількість ортофосфорної кислоти, ФК, %, (фактор X); кількість етидроновної кислоти, Е % (фактор Y), зміна яких наведена в таблиці 1.

Таблиця 1 - Фактори варіювання

Фактори	Код	Рівні варіювання		Інтервал варіювання
		Нижній 0	Верхній 1	
Ортофосфорна кислота ФК, %	X	10	20	10
Етидроновна кислота ЕК, %	Y	5	10	5

У якості вихідного параметру було обрано індекс горючості та втрата маси, значення яких фіксували на зразках, які піддавалися термічному впливу. Матриця планування експерименту та її математична реалізація наведена в табл. 3.2.

Таблиця 2 - Матриця експерименту та її реалізація

№ п/п	Фактори, вигляд		Матриця планування	
	X	Y	ФК, %	ЕК, %
1	-1	-1	10	5
2	1	-1	20	5
3	-1	1	10	10
4	1	1	20	10

У результаті моделювання отримані рівняння регресії та побудовані тернарні поверхні змін вихідного параметру в залежності від змін факторів варіювання (рис. 3).

Рівняння регресії:

$$I = 16,1 - 0,72 * x - 0,64 * y + 0,03 * x * y$$

$$\Delta m, g = 13,2 - 0,52 * x - 0,7 * y + 0,032 * x * y$$

$$t_{max, s} = -240 + 36 * x + 36 * y - 1,2 * x * y$$

$$T_{max, ^\circ C} = 500 - 18 * x - 18 * y + 0,81 * x * y,$$

де x- Фосфатна кислота, %; y- Етидроновна кислота, %.

Аналізуючи отримані результати та рівняння регресії впливу складу вогнезахисної речовини можна зробити висновок, що для забезпечення показників вогнезахисту оптимальним співвідношенням кислот є 2:1 – ФК:ЕК, а саме введення їх у кількості 15-18% фосфатної кислоти та 7-9% етидроновної кислоти отримано забезпечення високих показників вогнезахисної здатності просочувальної речовини.

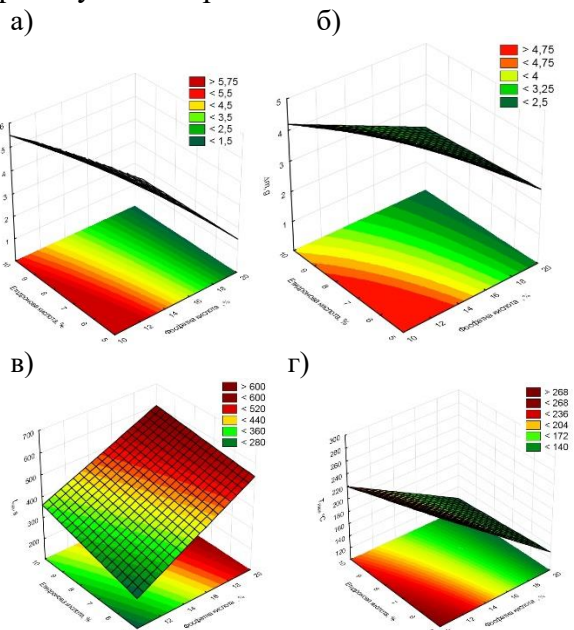


Рис. 3. Тернарні поверхні зміни складової вогнезахисної композиції після термічної дії при різних співвідношенні кислот:

а – індекс горючості, б – втрата маси, в – час займання, г – максимальна температура

Для підвищення вогнезахисної здатності просочувальної речовини для очерету також було проведено оптимізацію її складу за кількістю комплексу фосфатної і етидроновної кислот 2:1 – ФК:ЕК та карбаміду.

Таблиця 3 - Фактори варіювання

Фактори	Код	Рівні варіювання		Інтервал варіювання
		Нижній 0	Верхній 1	
Комплекс кислот, КК, %	X	21	27	6
Карбамід, К, %	Y	20	30	10

У якості вихідного параметру було обрано індекс горючості та втрата маси, значення яких фіксували на зразках, які піддавалися термічному впливу. Матриця планування експерименту та її математична реалізація наведена в табл. 4.

Таблиця 4 - Матриця експерименту та її реалізація

№ п/п	Фактори, вигляд		Матриця планування	
	X	Y	КК, %	К, %
1	-1	-1	21	20
2	1	-1	27	20
3	-1	1	21	30
4	1	1	27	30

У результаті моделювання були побудовані тернарні поверхні зміни вихідного параметру в залежності від факторів варіювання (рис. 4).

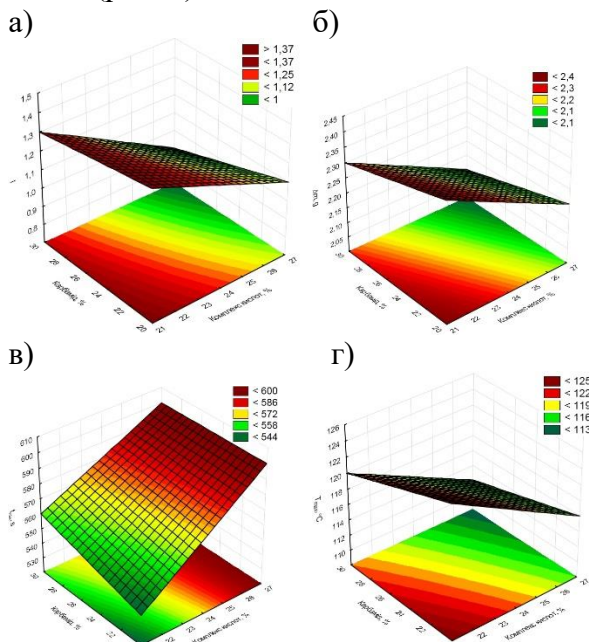


Рис. 4. Тернарні поверхні зміни складової вогнезахисної композиції після термічної дії при різних співвідношенні кислот і карбаміду: а – індекс горючості, б – втрата маси, в – часу займання, г – максимальної температури

Згідно отриманих результатів дослідження впливу факторів варіювання складу вогнезахисної речовини також були отримані рівняння регресії:

$$I = 1,95 - 0,016 * x + 0,025 * y - 0,001 * x * y$$

$$\Delta m, g = 3,3 - 0,033 * x - 0,009 * y - 0,001 * x * y$$

$$t_{max, s} = 150 + 16,67 * x + 9,0 * y - 0,33 * x * y$$

$$T_{max, ^\circ C} = 173,5 - 1,83 * x - 0,85 * y + 0,0167 * x * y$$

де x- комплекс кислот, %, y- карбамід, %.

Аналізуючи вплив складу вогнезахисної речовини можна зробити висновок, що для забезпечення показників вогнезахисту оптимальним співвідношенням кислоти до карбаміду є 1:1 – ФК:ЕК, а саме введення їх у кількості: 26-27% комплекс кислот та 28-30% карбамід.

Для встановлення необхідної кількості крохмалю у вогнезахисній суміші, що виконує роль загусника та в'язучого, який утворює на поверхні матеріалу відповідну плівку, проведені дослідження з визначення індексу горючості та максимальної температури вихідних газів з установки. До вищенаведеної композиції додавали крохмаль у кількості: 1 – 0 %, 2 – 10 %, 3 – 20 % та 4 – 50 % та наносили на поверхню і після висихання піддавали термічному впливу. Результати досліджень наведено на рис. 3 та табл. 5.

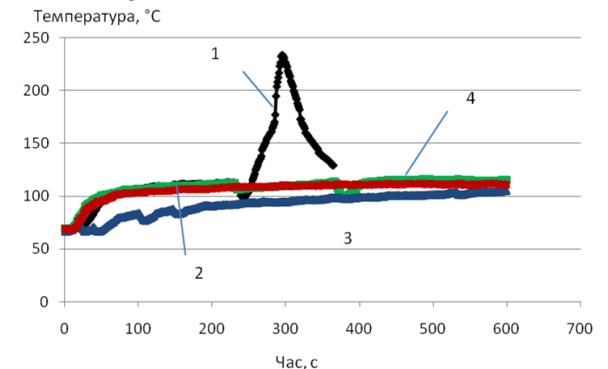


Рис. 5. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях очерету вогнезахисеного: 1 – просочувальний засіб на основі фосфату мочевины, 2 – просочувальний засіб + 10 % крохмалю, 3 – просочувальний засіб + 20 % крохмалю, 4 – просочувальний засіб + 40 % крохмалю

Таблиця 5 - Час проходження фронтом полум'я контрольних точок

Вогнезахищений зразок очерету	Температура димових газів, °С		Час займання, с	Час проходження фронтом полум'я ділянок зразка, с									Час досягнення $T_{max}$ димових газів, с	Довжина горіння зразка, мм	Індекс горючості
	$T_1$	$T_{max}$		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	68,3	234	146	2	4	6	10						295	120	73,67
2	68,7	115	595	86	-	-	-	-	-	-	-	-	522	6	3,62
3	66,9	105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	600	0	0
4	69,2	111	594	99	-	-	-	-	-	-	-	-	579	8	1,52

Дослідження показали, що при початковій температурі газоподібних продуктів горіння  $T=76$  °С, при дії радіаційної панелі на захищений зразок покрівельною композицією без крохмалю (крива 1, рис. 5), після 250 с термічного впливу, зразок загорівся, натомість, зразок вогнезахищених, покрівельним просочувальним розчином, а саме суміш карбаміду і фосфорних кислот та (10%) крохмалю у кількості 47,1 г/м<sup>2</sup>, зайнявся на 522 с, поширення полум'я поверхнею відбулося тільки на першу ділянку, максимальна температура димових газів становила 115 °С за час більший понад 1,8 разів, а індекс горючості знизився до 3,62. Ще більший ефект отримано при обробленні зразку очерету при додаванні крохмалю в 20 % (табл. 5). Підвищення крохмалю у композиції до 50 % за тих же витрат композиції призвело до підвищення індексу горючості для покрівельного просочувального розчину до 1,52 за рахунок зниження антипірену та короткочасного спалаху матеріалу. Вищенаведені результати дозволяють встановити співвідношення антипіренів та полімерів у даних композиціях та необхідну їх кількість.

**Висновки.** Таким чином, встановлено, особливості гальмування процесу займання та поширення полум'я очерету, що оброблений покрівельним просочувальним розчином, полягають у декількох аспектах. Це, розкладом антипіренів під дією температури з поглинанням тепла та виділенням негорючих газів (азот, діоксин вуглецю), що призводить гальмування окислення в

газовій і конденсованій фазі. Зміною напрямлення розкладу в сторону утворення негорючих газів і важкогорючого коксового залишку, зниження горіння матеріалу та відповідно зниження індексу горючості. Натомість покриття при дії високої температури сприяє утворенню тепло ізолювального шару коксу, що запобігає вигоранню і проходженню високої температури до матеріалу, що і підтверджується відсутністю процесу займання вогнезахищеного очерету. Це свідчить про можливість спрямованого регулювання процесів передавання високої температури до органічного матеріалу шляхом використання спеціальних покриттів для виробів з очерету.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення процесів структуроутворення захисного шару, встановлення взаємозв'язку між складовими і властивостями покриттів: пінококсу, термо- і атмосферостійкості.

**Подяка.** Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, яка виконувалась в рамках бюджетного фінансування № ЗДБ-2018.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Тычино Н.А. Особенности практического применения огне- и биозащитных средств для пропитки древесины [Текст] / Н.А. Тычино // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Вып. 6. – М.: ВНИИПО, 2002. – С. 38–43. – 3000 пр. – ISSN 0869-7493.
2. Леонович А.А. Химический подход к проблеме снижения пожароопасности древесных материалов [Текст] / А.А. Леонович //

- Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Вып. 3. – М.: ВНИИПО, 1996. – С. 10–14. – 2000 пр. – ISSN 0869-7493.
3. Бут В.П. Новый подход к огнебиозащите изделий из целлюлозы [Текст] / В.П. Бут, В.М. Жартовский и др. // Пожаровзрывобезопасность. – М.: ВНИИПО, 2004. – Вып. 5. – С. 31–32. – 3000 пр. – ISSN 0869-7493.
  4. Цапко Ю.В. проблемні питання щодо застосування вогнезахисту для виробів з очерету/ Ю.В. Цапко, О.Ю. Цапко. – Вісник ОДАБА. – Випуск 71. – 2018. – 143-148 с.
  5. Цапко Ю.В. Основні тенденції створення вогнезахисних спучуючих композицій для будівельних конструкцій / Ю.В. Цапко, А.В. Кравченко, П.В. Кривенко, М.В. Ніколаєнко. – Вісник ОДАБА. – Випуск 65. – 2016. – 142-147 с.
  6. Tsapko Yu., Tsapko A. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings. East European Journal Enterprise Technologies. – Vol. 3, №10 (87) 2017. – p. 50-55.
  7. Krivenko, P.V., Pushkarjeva, E.K., Sukhanovich, M.V., Guziy, S.G. Fireproof coatings on the basis of alkaline aluminum silicate systems / Developments in Strategic Materials: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Vol. 29, Issue 10, 2009, p. 129–142.
  8. Kyrychok, V. Influence of Temperature on Structure Formation Processes Geocements for Rehabilitation of Concrete / V. Kyrychok, R. Drochytka, P. Kryvenko // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1122. – P. 111–114. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1122.111
  9. Krivenko P. Protection of Timber from Combustion and Burning Using Alkaline Aluminosilicate-Based Coatings / P. Krivenko P., S. Guzii, A. Kravchenko // Advanced Materials Research Vol. 688 (2013), pp 3–9.

**Цапко Ю.В., Киричок В.І., Цапко О.Ю., Бондаренко О.П. АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ОГНЕЗАЩИТНОЙ КРОВЕЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ КАМЫША.** В работе исследованы процессы создания огнезащитной кровельной композиции для камыша, которая состоит из смеси неорганических и полимерных веществ. Установлено, что оптимизация неорганической составляющей приводит к направленному соотношению минеральных кислот и

карбамида, способных к эффективному огнезащиты материала, а добавление крахмала в количестве 20% образует на поверхности тростника защитную пленку. При этом, как свидетельствуют результаты термостойкости, происходит изменение структуры защитной пленки покрытия: увеличивается толщина защитного слоя за счет разложения композиции, приводит торможения окисления в газовой и конденсированной фазе, изменением направления расписания в сторону образования негорючих газов и трудногорючих коксового остатка, снижение горения материала и соответственно повышение индекса горючести. Покрытие при воздействии высокой температуры способствует образованию тепло изолирующего слоя кокса, что предотвращает выгорание и прохождению высокой температуры к материалу, что и подтверждается отсутствием процесса воспламенения огнезащищенного камыша.

**Ключевые слова:** камыш, горючесть, органико-неорганическая композиция, огнезащита, антипирен.

**Tsapko Yu., Киричок В.І., Tsapko A., Bondarenko O. ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF FIRE-PROTECTIVE ROOFING COMPOSITION FOR THE REED.** The work investigated the processes of creating a fire retardant roofing composition for reeds, which consists of a mixture of inorganic and polymeric substances. It was established that optimization of the inorganic component leads to a directional ratio of mineral acids and urea, capable of effective fire protection of the material, and the addition of starch in an amount of 20% forms a protective film on the surface of the reed. At the same time, as the results of thermal stability indicate, a change in the structure of the protective film of the coating occurs: the thickness of the protective layer increases due to decomposition of the composition, leads to inhibition of oxidation in the gas and condensed phase, changing the direction of the schedule towards the formation of non-combustible gases and slow-burning coke residue, accordingly an increase in the flammability index. Coating when exposed to high temperature contributes to the formation of a heat insulating layer of coke, which prevents burnout and the passage of high temperature to the material, which is confirmed by the absence of the ignition process of flame retardant reed.

**Key words:** reed, flammability, organic-inorganic composition, fire-protection.