

УДК 614.842

DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2024.45.6>**Цапко Ю.В.**

д.т.н., професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці,
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ
ORCID: 0000-0003-0625-0783

Цапко О.Ю.

PhD, ст. досл., доцент кафедри будівельних матеріалів,
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ
ORCID: 0000-0003-2298-068x

Бондаренко О.П.

к.т.н., доцент кафедри будівельних матеріалів,
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ
ORCID: 0000-0002-8164-6473

Ляліна Н.П.

д.т.н., професор кафедри товарознавства та комерційної діяльності в будівництві,
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ
ORCID: 0000-0002-9364-0925

Каверин К.О.

к.т.н., доцент кафедри будівельних матеріалів,
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ
ORCID: 0000-0001-9086-5953

Ющенко А.В.

студентка будівельно-технологічного факультету,
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ
ORCID: 0009-0002-0936-5789

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВОГНЕЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИМ ПОКРИТТЯМ З ВМІСТОМ ГІДРОКСИДУ АЛЮМІНІЯ

Анотація. Сьогодні існує два способи вогнезахисту деревини. Перший - просочення антипіре-
нами, найчастіше на основі неорганічних солей. При зволоженні деревини антипіре-
ни розчиня-
ються у вологому середовищі і поступово вимиваються на поверхню, після чого вогнезахисний
ефект з часом зменшується. Засоби на основі кислот не мають значної проблеми вимивання
через зміну вологості деревини, але, проникаючи глибоко в структуру деревини і взаємоді-
ючи з целюлозою, вони знижують показники міцності. Тому використовувати цей продукт
для критично важливих несучих конструкцій небезпечно. Другий спосіб полягає в нанесенні
на поверхню деревини покриття на основі органічних або неорганічних сполучних речовин.
Засоби на основі органічних сполучних мають підвищене димоутворення та токсичні речо-
вини, тому їх використання є небезпечним. Тому останнім часом широкого розповсюдження
набули покриття, здатні утворювати на поверхні будівельної конструкції теплоізоляційний
шар, який значно зменшує процеси передачі тепла до матеріалу. В результаті проведених
досліджень встановлено, що введення до складу органо-мінерального покриття гідроксиду
алюмінію в кількості 2...8% певною мірою знижує коефіцієнт набухання з 30 до 18. Однак,
для покриття, що містить 4%, виявлено підвищення ефективності вогнезахисту деревини,

а саме зменшення втрати маси зразка та температури димових газів за рахунок утворення термостійких сполук на поверхні вогнезахисного шару при взаємодії гідроксиду алюмінію з поліфосфатом амонію. Використання гідроксиду алюмінію у складі вогнезахисної композиції забезпечує необхідний рівень захисту деревини від термічних впливів на рівні 4%, що призводить до зниження собівартості та підвищення ефективності покриття. У подальших дослідженнях планується вивчити інші види наповнювачів, їх властивості та вплив на вогнезахисну ефективність деревини у вогнезахисних органо-мінеральних покриттях.

Ключові слова: *деревина, вогнезахист, органо-мінеральні покриття, гідроксид алюмінію, вогнезахисні властивості, ефективність.*

Постановка проблеми. Деревина, як будівельний матеріал, все частіше використовується у будівництві й архітектурі оскільки має значні позитивні експлуатаційні властивості. Однак, враховуючи високу горючість, є пожежонебезпечним матеріалом, що обмежує сферу її застосування, особливо у багатоповерховому дерев'яному будівництві. Збільшити ступінь безпечної експлуатації об'єктів, де використовуються матеріали і вироби з деревини, можливо за допомогою її захисного оброблення від вогню. Суть захисту деревини полягає в наданні їй здатності протистояти дії полум'я, поширенню полум'я поверхню, в протидії термоокислюванню структури та гальмуванню процесу займання.

Тому дослідження ефективності вогнезахисту деревини органо-мінеральними покриттями при додаванні гідроксиду алюмінію та встановлення його оптимальної концентрації є невідомою складовою забезпечення вогнестійкості та відповідно, визначає необхідність проведення таких досліджень.

Будівництво об'єктів, як цивільного так і промислового призначення, поєднано з застосуванням деревини, яка дуже чутлива до впливу високої температури та спроможна зберігати свої властивості при експлуатації.

Враховуючи це були прийняті нормативні документи, які вимагають при проектуванні конструкцій з деревини брати до уваги стійкість до горіння та проводити вогнезахисне оброблення конструкцій спеціальними засобами. Сутність захисту деревини тлумачиться в гальмуванні процесів термічного розкладу компонентів, зниженні константи швидкості реакцій та енергії активації, ізолюванні від дії полум'я і доступу кисню [1, 2].

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній найпоширенішим способом вогнезахисту деревини є просочення композиціями антипіренів, де виступають солі на основі неорганічних кислот [3]. При попаданні вологи на деревину зазначені солі розчиняються та

поступово мігрують на поверхню, що знижує вогнезахисний ефект [4, 5]. Засіб на основі кислот не має суттєву проблему вимивання під дією зміни вологості деревини, але проникаючи в глибину структури деревини і взаємодіючи з клітчастою, знижує міцнісні параметри. Тому цей засіб небезпечно використовувати для відповідальних несучих конструкцій. Другий спосіб – це нанесення на поверхню вогнезахисного покриття. Окремі засоби при термічному впливі характеризуються виділенням токсичних продуктів горіння та мають підвищене димоутворення, а тому обмежене використання.

У зв'язку з цим набули поширення покриття, що утворюють при термічній дії на поверхні деревини теплоізоляційний піноковий шар, що знижує процеси теплопередачі.

В роботі [6] показано, що хімічна речовина як полідиметилсилоксан, що модифікований кремнеземним геополімером, на поверхні деревини створює нове гібридне покриття, яке здатне гальмувати горіння. Також досліджено вплив на вогнестійкість в'язкості полідиметилсилоксану у 350 срс (конусний в'язкозиметр). У свою чергу включення полідиметилсилоксану призводить до зниження втрати ваги при горінні до 52,51%, а також зниження середньої швидкості горіння до 0,0674 м/с та значне придушення диму. Про те надмірна в'язкість полідиметилсилоксану проявляється зниження вогнестійкості гіпополімерного покриття на основі діоксиду кремнію.

Для підвищення вогнестійкості деревини у роботі [7] запропоновано застосовувати термічно розширений графіт та вуглецеві нанотрубки. Вплив цих матеріалів на вогнезахист та приглушення диму даним покриттям досліджено експериментальними випробуваннями на вогнестійкість, а також термогравіметриєю на диференціально скануючому калориметрі, тестом на дим та випробуваннями на стійкість до води. Результати випробувань на протипожежний захист показали, що за рахунок дода-

вання 1% вмісту вуглецевих матеріалів вогнестійкість покриттів була підвищена. У свою чергу аналіз термогравіметричних досліджень показав, що вуглецеві матеріали збільшують залишкову масу і термостійкість покриття. Після занурення зразків покриття у воду на 360 год вуглецеві матеріали можуть сформувати бар'єр для підвищення водостійкості деревини. Особливо водостійкість притаманна для графіту, який показав найкращі показники. Проте не наведено, що було в'яжучим.

У статті [8] запропонована стратегія міжфазного нанесення покриття для гальмування горіння, а не підвищення кількості вогнезахисних речовин. Водна композиція поліелектролітичних комплексів складається з поліетиленіміну та поліфосфату амонію. Сформоване покриття на цій основі має високу вогнестійкість та демонструє високий показник кисню у 43% та зниження швидкості виділення тепла на 47% для тестів на конусну калориметрію. Крім того, покриття з поліетиленіміну та поліфосфату амонію підвищило взаємодію між вуглецевими волокнами і матрицею та покращило температуру склування композиту і відповідно механічні властивості. Тому ці дослідження і представляють стратегію розробки композитів армованих волокнами із високими вогнезахисними та механічними властивостями. Але залишаються деякі невирішені питання, що пов'язані з механізмом утворення пінококсу. Причиною цього є тонкощі щодо утворення теплоізоляційного шару, що відповідно робить такі дослідження досить складними.

Тому сучасні методи вогнезахисту дерев'яних будівельних конструкцій ґрунтуються на використанні покриттів, що утворюють шар пінококсу, які являють собою складні системи як органічних, так і неорганічних компонентів, але здатні до поступового вигорання при тривалій дії полум'я та відповідно до зниження вогнестійкості конструкції, що потребують збільшення речовин, здатних утворити стійкий теплоізолювальний шар пінококсу.

Таким чином, встановлено, що вогнезахисні покриття здатні утворювати на поверхні деревини захисний теплоізоляційний шар від впливу вогню при її експлуатації, але не визначені параметри, які забезпечують ефективність вогнезахисних покриттів до дії полум'я пожежі. Тому дослідження параметрів вогнезахисту деревини і впливу покриттів на вогнезахист обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Метою роботи є дослідження ефективності вогнезахисту деревини органо-мінеральним покриттям при додаванні гідроксиду алюмінію та встановлення його оптимальну концентрації.

Матеріали і методи досліджень. Для розробки ефективного вогнезахисного покриття для деревини було використано суміш на основі органічного в'яжучого, газотворювачів, пірофорів та мінеральних речовин. Проведені дослідження згідно з [9, 10] з визначення групи горючості деревини, обробленої запропонованим покриттям.

Суть методу випробувань з експериментального визначення групи важкогорючих та горючих твердих речовин і матеріалів згідно з [9, 10] полягає у дії на зразок, що розміщений в керамічній трубці приладу ОТМ, полум'я пальника із температурою газоподібних продуктів горіння $200^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ протягом 300 с. При проведенні досліджень фіксується приріст температури горіння (Δt) та визначається втрата маси зразка (Δm). За результатами випробувань матеріали класифікуються як:

- важкогорючі – $\Delta t < 60^{\circ}\text{C}$ та $\Delta m < 60\%$;
- горючі – $\Delta t \geq 60^{\circ}\text{C}$ чи $\Delta m \geq 60\%$.

Горючі матеріали у свою чергу поділяються в залежності від часу (τ) досягнення максимальної температури летких продуктів горіння на:

- важкозаймисті – $\tau > 240$ с;
- середньої займистості – $30 \text{ с} \leq \tau \leq 240$ с;
- легкозаймисті – $\tau < 30$ с.

Результати досліджень. Результати досліджень з визначення приросту максимальної температури газоподібних продуктів горіння (Δt , $^{\circ}\text{C}$) та втрати маси зразків (Δm , %) деревини як необробленої так і вогнезахисної покриттям представлено на рисунках 1, 2.

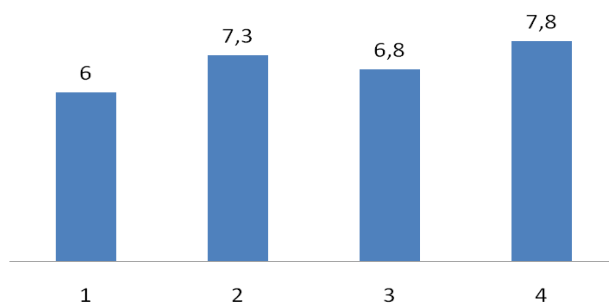


Рис. 1. Результати досліджень з втрати маси зразків деревини після вогневих випробувань Δm , % з кількістю гідроксиду алюмінію в покритті: 1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 4%; 4 – 8%

Для досліджень групи горючості деревини готували зразки з деревини сосни розміром 150x60x30 мм. Зразки кондиціювали при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$. На поверхню зразків деревини наносили покриття у два шари з проміжним сушінням через 3 години.

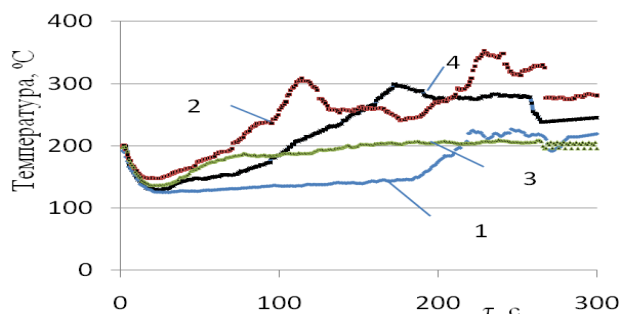


Рис. 2. Динаміка наростання температури димових газів при випробуванні вогнезахисної деревини з кількістю гідроксиду алюмінію в покритті: 1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 4%; 4 – 8%

Дослідження показали, що при нанесенні покриття (витратою у межах $260 \pm 5 \text{ г/м}^2$) з додаванням гідроксиду алюмінію в кількості 2% та 8% вогнезахисна деревина відноситься до матеріалів середньої займистості. Така кількість покриття не дає необхідного вогнезахисту і потребує збільшення шару покриття. При початковій температурі на виході з печі газоподібних продуктів горіння $T = 200^\circ\text{C}$, при дії полум'я палика на вогнезахисний зразок № 1 та 3, температура газоподібних продуктів горіння становила $T = 260^\circ\text{C}$, що забезпечило важкогорючі властивості. Враховуючи неоднорідність матеріалу (деревини) для встановлення доцільності застосування мінеральних добавок запропоновано провести дослідження механізму роботи покриття.

Для встановлення ефективності застосування гідроксиду алюмінію для покриттів проведено випробування коефіцієнту спучення зразків покриття за методикою [11, 12]. Результати отриманих даних наведено у таблиці 1.

Як видно з таблиці 1 найбільш ефективно спучується базове покриття, яке складається з полі фосфату амонію, мелаїну, пентаеритру і в'язучого на основі полівінілацетатної дисперсії. Додаванням гідроксиду алюмінію в певній мірі знижує коефіцієнт спучення, але утворює на поверхні покриття тугоплавкі з'єднання, які не вигорають та утворюють теплостійкий шар.

Показники основних властивостей зразків покриття наведено на рис. 3.

Таблиця 1. Коефіцієнт спучування покриття після випробування

Зразок покриття	Товщина покриття, мм	Температура печі, $^\circ\text{C}$	Коефіцієнт спучення, після випробувань
База	0,2	500	30,1
База + 2% $\text{Al}(\text{OH})_3$	0,2	500	29,0
База + 4% $\text{Al}(\text{OH})_3$	0,2	500	20,4
База + 8% $\text{Al}(\text{OH})_3$	0,2	500	18,0

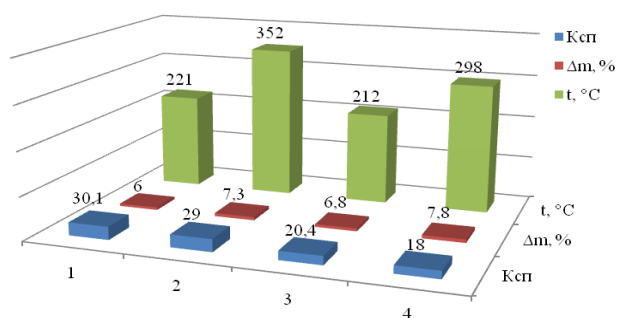


Рис. 3. Показники основних властивостей зразків покриття з кількістю гідроксиду алюмінію в покритті: 1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 4%; 4 – 8%

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що введення гідроксиду алюмінію до складу покриття в кількості 2...8% у певній мірі знижує коефіцієнт спучення від 30 до 18, але для покриття, що містить 4% встановлено підвищення ефективності вогнезахисту деревини, а саме зниження втрати маси зразків та температури димових газів за рахунок утворення на поверхні вогнезахисного шару термостійких сполук при взаємодії гідроксиду алюмінію з поліфосфатом амонію (рис. 3).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, застосування гідроксиду алюмінію у вогнезахисній композиції забезпечує необхідний рівень захисту деревини від термічного впливу за необхідної його кількості 4%, що призводить до зниження вартості та підвищення ефективності покриття.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення інших видів наповнювачів, їх властивостей і впливу на вогнезахисну ефективність деревини у вогнезахисних органічно-мінеральних покриттях.

Література

1. Цапко Ю.В., Ломага В.В., Цапко О.Ю. Вогнезахист деревини органо-неорганічними композиціями. Монографія. Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2023. 160 с.
2. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O. Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed sample. Eastern-European Journal Enterprise Technologies. Vol. 1. No 10 (97). 2019. P. 36-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644.
3. 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. Vol. 114. 2017. P. 101-110. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.049.
4. Krüger S., Gregor J., Gluth G., Watolla M.-B., Morys M., Häbler D., Schartel B. Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen. Berlin, Bautechnik. Vol. 93/8. 2016. P. 531-542. DOI: 10.1002/bate.201600032.
5. Janetti M.B., Wagner P. Analytical model for the moisture absorption in capillary active building materials. Building and Environment. Vol. 126. 2017. P. 98-106.
6. Wang Y., Zhao J., Chen J. Effect of polydimethylsiloxane viscosity on silica fume-based geopolymer hybrid coating for flame-retarding plywood. Construction and Building Materials. Vol. 239. 117814. 2020. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117814.
7. Zhan W., Chen L., Cui F., Gu Z., Jiang J. Effects of carbon materials on fire protection and smoke suppression of waterborne intumescent coating. Progress in Organic Coatings. Vol. 140. 105491. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105491.
8. Shi X.-H., Chen L., Zhao Q., Li Y.-M., Wang Y.-Z. Epoxy resin composites reinforced and fire-retarded by surficially-treated carbon fibers via a tunable and facile process. Composites Science and Technology. Vol. 187. 2020. 107945. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107945.
9. ДБН В 1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів. Загальні вимоги. Київ, 2017. 20 с.
10. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Київ, 2020. 20 с.
11. Цапко Ю.В., Кривенко П.В., Гузій С.Г. і ін. Пристрій для визначення кінетики спучування вогнезахисного покриття. Патент на корисну модель, 11355. Україна, МПК G01N 23/00. Заявл. 12.05.2016. Опубл. 10.02.2017. Бюл. №3. 3 с.
12. Цапко Ю.В., Кривенко П.В., Гузій С.Г. і ін. Експрес-метод визначення кінетики спучування вогнезахисного покриття. Патент на корисну модель, 1356. Україна, МПК C09K 15/02, E04B 1/92. Заявл. 12.05.2016. Опубл. 10.02.2017. Бюл. №3. 3 с.

References

1. Tsapko, Yu.V., Lomaga, V.V., Tsapko, O.Yu. (2023). "Vognnezakhyst derevyny organo-neorganichnymy kompozytsiyamy: Monografiya", Kyiv: FOP Yamchynskii O.V., 160 p.
2. 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.
3. 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.
4. Krüger, S., Gregor, J., Gluth, G., Watolla, M.-B., Morys, M., Häbler, D., Schartel, B. (2016). "Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen", Berlin, Bautechnik, 93/8, 531-542. DOI: 10.1002/bate.201600032.
5. Janetti, M.B., Wagner, P. (2017). "Analytical model for the moisture absorption in capillary active building materials", Building and Environment, 126, 98-106.
6. Wang, Y., Zhao, J., Chen, J. (2020). "Effect of polydimethylsiloxane viscosity on silica fume-based geopolymer hybrid coating for flame-retarding plywood", Construction and Building Materials, 239, 117814. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117814.
7. Zhan, W., Chen, L., Cui, F., Gu, Z., Jiang, J. (2020). "Effects of carbon materials on fire protection and smoke suppression of waterborne intumescent coating", Progress in Organic Coatings, 140, 105491. DOI:https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105491.
8. Shi, X.-H., Chen, L., Zhao, Q., Li, Y.-M., Wang, Y.-Z. (2020) "Epoxy resin composites reinforced and fire-retarded by surficially-treated carbon fibers via a tunable and facile process", Composites Science and Technology, 187, 107945. DOI:10.1016/j.compscitech.2019.107945.
9. DBN V 1.1-7:2016 (2017). "Pozhezhna bezpeka obyektiv. Zagalni vymogy, Kyiv, 20 p..
10. DSTU 8829:2019 (2020). "Pozhezhovybukhonebezpechnist rechovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennya. Klyasyfikatsiya", Kyiv, 20 p.
11. Tsapko Yu.V., Kryvenko P.V., Guziy S.G. etc. (2017) "A device for determining the swelling kinetics of a fire-resistant coating", Utility model patent, 11355 Ukraine, IPC G01N 23/00, Application 12.05.2016, Publ. 10.02.2017, Bul. No. 3, 3 p.
12. Tsapko Yu.V., Kryvenko P.V., Guziy S.G. etc. (2017) "Express method for determining the swelling kinetics of a fire-resistant coating", Utility model patent, 1356 Ukraine, IPC C09K 15/02, E04B 1/92, Application 12.05.2016, Publ. 10.02.2017, Bul. No. 3, 3 p.

EFFECTIVENESS OF FIRE PROTECTION OF WOOD BY ORGANO-MINERAL COATING CONTAINING ALUMINUM HYDROXIDE

Abstract. Today, there are two methods of fire protection for wood. The first is impregnation with flame retardants, most often based on inorganic salts. When wood is moistened, fire retardants dissolve in a humid environment and gradually wash out to the surface, and then the fire retardant effect

decreases over time. Acid-based products do not have a significant leaching problem due to changes in wood moisture, but penetrating deep into the wood structure and interacting with the cellulose, they reduce strength parameters. Therefore, it is not safe to use this product for critical load-bearing structures. The second method is to apply an organic or inorganic binder coating to the wood surface. Organic binder-based products have increased smoke generation and toxic substances, so their use is dangerous. Therefore, coatings capable of forming a heat-insulating layer on the surface of a building structure, which significantly reduces the processes of heat transfer to the material, have recently become widespread. As a result of the studies, it was found that the introduction of aluminium hydroxide into the composition of the organo-mineral coating in the amount of 2...8% reduces the swelling coefficient from 30 to 18 to a certain extent. However, for a coating containing 4%, an increase in the efficiency of fire protection of wood was found, namely a decrease in the loss of sample mass and flue gas temperature due to the formation of heat-resistant compounds on the surface of the fire protection layer when aluminium hydroxide interacts with ammonium polyphosphate. The use of aluminium hydroxide in the fireproofing composition provides the required level of protection of wood from thermal effects at the required amount of 4%, which leads to a reduction in cost and an increase in the efficiency of the coating. In further studies, it is planned to investigate other types of fillers, their properties and impact on the fire protection efficiency of wood in fireproof organic-mineral coatings.
Key words: *wood, fire protection, organo-mineral coatings, aluminum hydroxide, fire retardant properties, efficiency.*

Tsapko Yu.V.

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Environmental Protection Technologies and Occupational Safety,
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Tsapko O.Yu.

PhD, Associate Professor at the Department of Building Materials,
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Bondarenko O.P.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Building Materials,
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Lyalina N.P.

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Commodity and Commercial Activities in Construction,
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Kaveryn K.A.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Building Materials,
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Yushchenko A.V.

Student at the Faculty at Construction and Technology,
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv