



А. Ф. Гаврилюк¹, М. О. Гайдук²

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна
²Аварійно-рятувальний загін спеціального призначення ГУ ДСНС України у Хмельницькій області, м. Хмельницьк, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8727-9950> – А. Ф. Гаврилюк
<https://orcid.org/0009-0002-5248-322X> – М. О. Гайдук
✉ gavrilyk3@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИН ДЛЯ ВОГНЕЗАХИСТУ ДЕРЕВ'ЯНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЗАМІНІ ВОГНЕЗАХИСНИХ ЗАСОБІВ

Постановка проблеми. На об'єктах різних форм власності, на яких здійснюються заходи державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки, щороку виникають тисячі пожеж. У значній кількості випадків пожежі виникають у будівлях, в яких, відповідно до Правил пожежної безпеки в Україні, дерев'яні будівельні конструкції підлягають вогнезахисту. Вогнезахист забезпечує зниження показників пожежної небезпеки, зокрема горючості, займистості, поширення полум'я та ін.

Відповідно до Правил з вогнезахисту для деревини визначено, що основним критерієм оцінювання є група вогнезахисної ефективності, яка характеризується визначенням відсотка втрати маси деревини, підданої вогнезахисту, після проведення випробувань. Для дерев'яних будівельних конструкцій характерні способи вогнезахисту, такі як вогнезахисне просочування та оброблення.

В Україні широкого застосування набуло саме вогнезахисне просочування. Проаналізувавши якість вогнезахисту шляхом просочування було виявлено, що при виконанні повторних робіт з вогнезахисту із застосуванням засобу, відмінного від того, що використовувався під час попереднього просочування, відбувається втрата вогнезахисної ефективності. Проведені експерименти підтвердили цю гіпотезу та спонукали виокремлення цього напрямку для подальших досліджень.

Мета роботи — розкриття закономірностей впливу співвідношення складу вогнезахисної речовини на забезпечення вогнезахисту дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисних засобів.

Методи дослідження. У рамках наукової роботи проведено аналітичні дослідження компонентів просочувальних вогнебіозахисних речовин. Окремі речовини досліджено із застосуванням методів хімічного та рентгенофлуоресцентного аналізу. На основі ідентифікованих компонентів, а також з урахуванням результатів попередніх досліджень, сплановано та реалізовано повнофакторний експеримент.

Основні результати дослідження. Проведено повнофакторний експеримент, у межах якого визначено ключові фактори та рівні їх варіювання, що забезпечило побудову математичної моделі. На підставі цієї моделі побудовано матрицю експерименту. Реалізовано вісім експериментальних дослідів за визначеними методами, отримано числові значення втрати маси та температури займання, що дало змогу розрахувати коефіцієнти регресії.

Із використанням рентгенофлуоресцентного аналізу та методів хімічного аналізу встановлено, що найчастіше до складу вогнебіозахисних речовин входять такі компоненти: діамонійфосфат, ортофосфорна кислота та карбамід. На основі визначених компонентів методом повнофакторного експерименту розроблено оптимальне співвідношення складу вогнезахисної речовини, що забезпечує вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисних засобів. Встановлено закономірність впливу відсоткового масового значення фосфатної кислоти, карбаміду та діамонійфосфату на вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій — зокрема, на температуру займання та втрату маси.

Висновки. На підставі аналізу даних експериментальних досліджень, рівнянь регресії та графічних залежностей визначено співвідношення масового складу вогнезахисної речовини, що здатна забезпечити вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисних засобів, а саме: діамонійфосфат — 4%, карбамід — 6%, фосфатна кислота — 12%, вода — 78%.

Ключові слова: показники вогнезахисної ефективності, заміна вогнезахисного засобу, вогнезахисне оброблення, вогнезахист, просочування, повнофакторний експеримент.

STUDY OF THE COMPOSITION OF SUBSTANCES FOR FIRE PROTECTION OF WOODEN BUILDING STRUCTURES IN THE CONTEXT OF REPLACING FIRE-RETARDANT AGENTS

Introduction. Thousands of fires occur every year at facilities of various forms of ownership, where state supervision (control) measures are carried out in the field of technogenic and fire safety. In a significant number of cases, fires occur in buildings in which, according to the Fire Safety Rules in Ukraine, wooden building structures are subject to fire protection. Fire protection ensures a reduction in fire hazard indicators, in particular combustibility, flammability, flame spread, etc.

According to the Fire Protection Rules for Wood, it is determined that the main criterion is the fire protection efficiency group, which is characterized by determining the percentage of mass loss of wood subjected to fire protection after testing. Fire protection methods such as fire protection impregnation and treatment are characteristic of wooden building structures.

Fire protection impregnation itself has become widely used in Ukraine. When analyzing the quality of fire protection by impregnation, it was found that when performing repeated fire protection work using a product different from that used during the previous impregnation, there is a loss of fire protection efficiency. The experiments conducted confirmed this hypothesis and prompted the isolation of this direction for further research.

The purpose of the work is to reveal the patterns of the influence of the ratio of the composition of the fire retardant on ensuring fire protection of wooden building structures when replacing fire retardants.

Methods. As part of the scientific work, analytical studies of the components of impregnating fire and bioprotective substances were conducted. Individual substances were studied using chemical and X-ray fluorescence analysis methods. Based on the identified components, as well as taking into account the results of previous studies, a full-factorial experiment was planned and implemented.

Results. A full-factorial experiment was conducted, within the framework of which key factors and their levels of variation were determined, which ensured the construction of a mathematical model. Based on this model, an experimental matrix was constructed. Eight experimental studies were carried out according to the specified methods, numerical values of mass loss and ignition temperature were obtained, which made it possible to calculate regression coefficients.

Using X-ray fluorescence analysis and chemical analysis methods, it was established that the most common components of fire-retardant substances are diammonium phosphate, orthophosphoric acid and urea. Based on the specified components, the optimal ratio of the composition of the fire-retardant substance was developed using the full-factorial experiment method, which ensures fire protection of wooden building structures when replacing fire-retardant agents. The pattern of the influence of the percentage mass value of phosphoric acid, urea and diammonium phosphate on the fire protection of wooden building structures - in particular, on the ignition temperature and mass loss - was established.

Conclusion. Based on the analysis of experimental research data, regression equations and graphical dependencies, the ratio of the mass composition of the fire retardant substance that is capable of providing fire protection of wooden building structures when replacing fire retardants was determined, namely: diammonium phosphate – 4%, urea – 6%, phosphoric acid – 12%, water – 78%.

Keywords: fire retardant efficiency indicators, fire retardant replacement, fire retardant treatment, fire protection, impregnation, full-factor experiment.

Постановка проблеми. На об'єктах різних форм власності, на яких здійснюються заходи державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки в період 2020-2024 років виникли 14211 пожеж. [1]. З них у 330 випадках місцем виникнення пожежі стали горище, перекриття або покрівля. Більш детальним аналізом причин пожеж було виявлено, що у 11% пожежі виникали в будинках, дерев'яні елементи горищних покриттів (крокви, лати) яких повинні оброблятися засобами вогнезахисту (крім будинків V ступеня вогнестійкості). На одну пожежу на зазначених об'єктах припадає не менше 5 мільйонів гривень прямих збитків, що підтверджує необхідність дослідження пожеж такого роду.

Дерев'яні будівельні конструкції мають значну кількість показників пожежної небезпеки [2], зокрема: горючість, займистість, димоутворювальна здатність, поширення полум'я та ін. Більшість з них визначають за результатами лабораторних досліджень [3]. Відповідно до [4], для вогнезахисту деревини основним критерієм є група вогнезахисної ефективності, що характеризується визначенням відсотка втрати маси деревини, підданої вогнезахисту, після проведення випробувань. В цілому класифікація вогнезахисних засобів визначена у [2]. Для дерев'яних будівельних конструкцій характерні способи вогнезахисту, такі як вогнезахисне просочування та оброблення.

В Україні широкого застосування набуло саме вогнезахисне просочування. Це зумовлено балансом високої ефективності та економічної доступності вогнезахисних засобів, а також можливістю безпосереднього контролю з боку представників територіальних підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій за якістю виконаних робіт з вогнезахисного просочування.

У період з 2020 року по 2024 рік працівниками ДСНС проведено перевірку якості вогнезахисної обробки на 6693 об'єктах по Україні [5-9]. Згідно з аналітичними даними спостерігається тенденція до залучення представників територіальних підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) до комісій з перевірок вогнезахисту дерев'яних будівельних конструкцій.

Така тенденція свідчить, про збільшення кількості виконаних робіт з вогнезахисту, а також про зацікавлення замовників вогнезахисного просочування у якісному виконанні робіт, що у свою чергу забезпечує ефективну пожежну безпеку об'єкта. Можливість участі представників територіальних підрозділів ДСНС у процесі перевірки вогнезахисту не лише забезпечує контроль за якісним виконанням робіт з вогнезахисного просочування, а й надає можливість виявити та проаналізувати існуючі проблеми у цій сфері.

За результатами одного з таких аналізів було виявлено, що при виконанні повторних робіт з вогнезахисту з застосуванням вогнезахисного засобу відмінного від того, що застосовувався при попередньому вогнезахисному просочуванні, відбувається втрата вогнезахисної ефективності. Для більш детального вивчення цього факту були проведені дослідження [10-11]. Результати досліджень підтвердили, що при проведенні повторного вогнезахисного просочування іншими вогнезахисними речовинами відбувається зниження показників вогнезахисної ефективності, що дозволяє сформувати цю тематику, як окрему задачу для подальших досліджень.

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

Дослідженням вогнезахисту дерев'яних будівельних конструкцій, в Україні, впродовж останніх років займаються: Ю. Цапко, О. Цапко, В. Ломага, С. Жартовський, О., Добростан, В. Коваленко, Р. Веселівський, О. Пазен, А. Чернуха [12-15].

Зокрема дослідники Ю. Цапко та А. Цапко в роботі [16] встановили, що вогнезахисна обробка переводить деревину у важкогорючий матеріал, який не поширює полум'я по поверхні та має помірну димоутворювальну здатність.

В науковій праці [17] автори представили комплексний підхід до оцінювання ефективності вогнезахисних покриттів для деревини.

В роботі [18] науковці представили інноваційний нанокompозит для деревини з

багатофункціональними властивостями: вогнезахистом, антимікробністю, механічною міцністю та здатністю запобігати горінню.

Дослідниця О. Пінчевська в праці [19] проаналізувала ефективність вогнезахисних засобів на основі неорганічних в'язучих матеріалів та їх вплив на зниження горючості деревини.

В науковій статті [20] проведені дослідження сучасних досягнень у розробці вогнезахисних добавок на основі біомаси для полімерних матеріалів. Основна увага приділена екологічно безпечним альтернативам традиційним галогеновмісним антипіренам, які негативно впливають на здоров'я людини та довкілля.

За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що науковці досліджують показники пожежної небезпеки вогнебіозахисних засобів, оцінюють ефективність вогнезахисних покриттів, впроваджують інноваційні підходи до розроблення вогнезахисних засобів із застосуванням неорганічних в'язучих та досліджують вплив антипіренів на довкілля і людину. Поруч з цим абсолютно не проводяться дослідження ефективності вогнебіозахисних засобів в умовах їх заміни при проведенні повторних робіт з вогнезахисного просочування. Також при розробці нових речовин для вогнебіозахисного просочування не враховується можливість їх несумісності.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – розкриття закономірностей впливу співвідношення складу вогнезахисної речовини на забезпечення вогнезахисту дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисних засобів.

Для цього необхідно розв'язати такі задачі:

- дослідити компоненти просочувальних вогнебіозахисних речовин, що найчастіше використовуються в Україні, для формування базового складу рецептури композиції, яка забезпечить ефективний вогнезахист при заміні вогнезахисних засобів;

- на основі експериментальних досліджень впливу заміни вогнезахисних засобів на показники пожежної небезпеки дерев'яних будівельних конструкцій і комплектності компонентів вогнебіозахисних речовин методом повнофакторного експерименту визначити залежності впливу основних компонентів вогнезахисних засобів на показники пожежної небезпеки дерев'яних будівельних конструкцій.

Методи досліджень. В результаті проведення експериментальних досліджень показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисного засобу [11] було виявлено, що втрата маси збільшується в діапазоні 0,5% – 4,6%, температура займання збільшується від 5°C до 25°C, а кількість зразків, що підтримують самостійне горіння, зростає від 20% до 50%.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводились з різними комбінаціями заміни вогнезахисних засобів ДСА-1, Біофлейм, Ecossept 450-1, Фаєр-of, які згідно зі статистичними

даними, застосовувались найчастіше в продовж останніх 5 років. Варіанти комбінації заміни вогнезахисних засобів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Зразки, що були виготовлені для експериментального дослідження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій при зміні вогнезахисного засобу

№з/п	Номер присвоєний зразку	Назва вогнезахисного засобу, яким проведено перше вогнезахисне просочування	Назва вогнезахисного засобу, яким проведено повторне вогнезахисне просочування
1	1	ДСА-1	ДСА-1
2	1,1	ДСА-1	Біофлейм
3	1,2	ДСА-1	Ecossept 450-1
4	1,3	ДСА-1	Фаєр-off
5	2	Біофлейм	Біофлейм
6	2,1	Біофлейм	ДСА-1
7	2,2	Біофлейм	Ecossept 450-1
8	2,3	Біофлейм	Фаєр-off
9	3	Ecossept 450-1	Ecossept 450-1
10	3,1	Ecossept 450-1	ДСА-1
11	3,2	Ecossept 450-1	Біофлейм
12	3,3	Ecossept 450-1	Фаєр-off
13	4	Фаєр-off	Фаєр-off
14	4,1	Фаєр-off	ДСА-1
15	4,2	Фаєр-off	Біофлейм
16	4,3	Фаєр-off	Ecossept 450-1

Детальним аналізом результатів експериментальних досліджень виявлено, що при заміні вогнезахисних засобів при повторному вогнезахисті, показники пожежної небезпеки змінюються залежно від вогнебіозахисних речовин, які застосовані. Результати досліджень було порівняно з результатами

випробувань зразків, де повторне просочування виконувалось тією ж речовиною, що і первинне просочування, тобто без заміни вогнезахисного засобу. Найменше зниження відсотка втрати маси на рівні 0,6% зафіксоване в комбінаціях заміни з вогнезахисним засобом Біофлейм (рисунк 1).

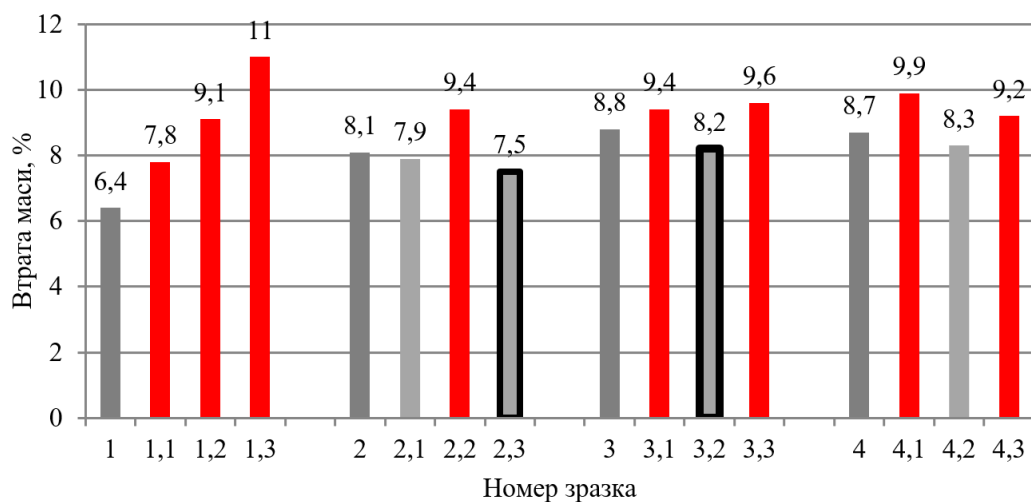


Рисунок 1 – Найменша втрата маси в комбінації з вогнезахисним засобом Біофлейм

За ознакою самостійного горіння в 3-х з 5-ти випадків стабільно якісні показники (не більше 10%

підтримували самостійне горіння/тління) в комбінції з вогнезахисним засобом Ecossept 450-1 (рисунк 2).

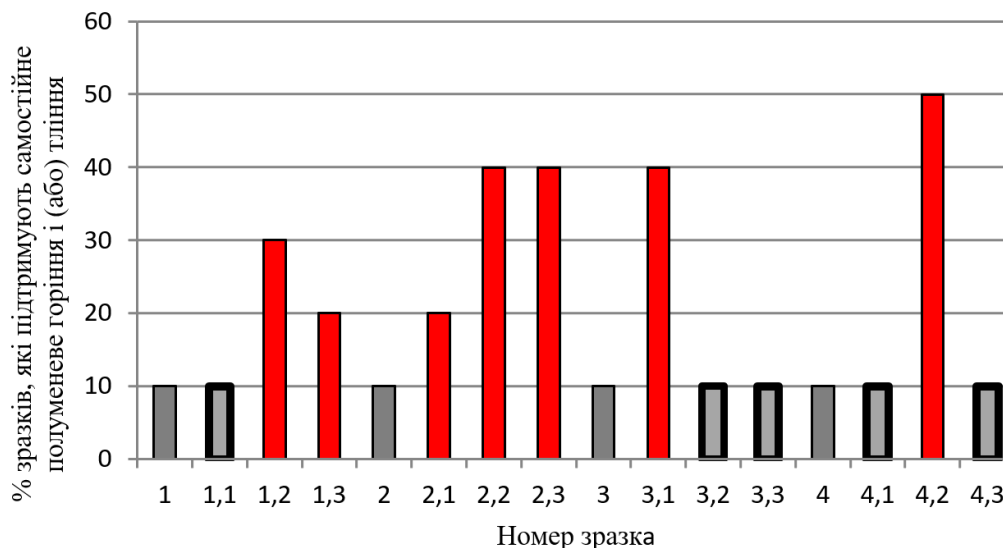


Рисунок 2 – За ознакою самостійного горіння в 3-х з 5-ти випадків стабільно хороші показники в комбінації з вогнезахисним засобом Ecosept 450-1

Досягнення найвищої температури займання вогнезахисним засобом ДСА-1. Результати 345°C та 315°C було зафіксоване у комбінації з досліджень наведені на рисунку 3.

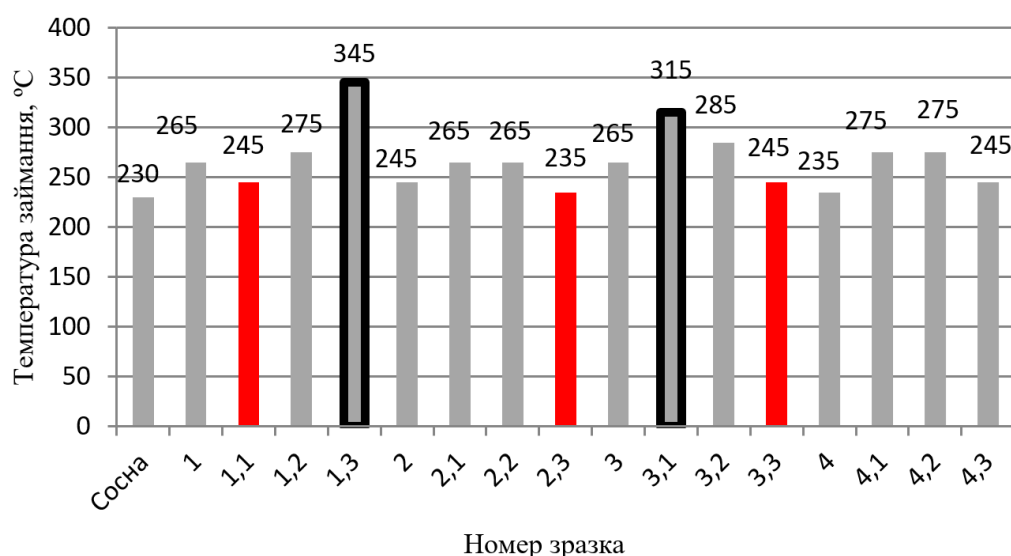


Рисунок 3 – Найбільша температура займання в комбінації з вогнезахисним засобом ДСА-1

На основі отриманих результатів для подальшого дослідження основних складових компонентів обрані критерії втрати маси і температури займання та вогнезахисні засоби Біофлейм, Ecosept 450-1 та ДСА-1.

В результаті аналітичних досліджень та застосування методів рентгенофлуоресцентного та хімічного аналізу вдалось визначити склад досліджуваних речовин.

Основними компонентами вогнебіозахисних речовин, що досліджувались, є діамонійфосфат, карбамід, ортофосфорна кислота, сульфат амонію, а також змочувач і фунгіциди та інсектициди. Діафонійфосфат, карбамід та ортофосфорна кислота мають найбільші масові концентрації, що стало підставою обрати ці компоненти, як

фактори для проведення повнофакторного експерименту з розроблення оптимальної рецептури вогнезахисної речовини, що забезпечить вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисних засобів.

Варіювання факторів здійснено у 3 інтервалах – мінімальному, середньому та максимальному. Середній рівень обрано виключно для визначення інтервалів варіювання. Це дозволило вивчити взаємозв'язки між цими факторами і вплив кожного на кінцеві властивості розчину. Значення інтервалів параметрів обрані на основі літературного аналізу відомих складів вогнезахисних засобів, а також з огляду на власні попередні дослідження та результати експериментів (таблиця 2).

Таблиця 2

Інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів

Ортофосфорна кислота, f %			Карбамід, k %			Діаммонійфосфат, d %		
Найменше значення, f_-	Середнє значення, f_0	Найбільше значення, f_+	Найменше значення, k_-	Середнє значення, k_0	Найбільше значення, k_+	Найменше значення, d_-	Середнє значення, d_0	Найбільше значення, d_+
2	16	30	2	11	20	2	6	10

Враховуючи обрані фактори та рівні, нелінійна залежність гіпотези, її математична модель виражається формою регресійного рівняння 2-го порядку:

$$T = \varphi_0 + \varphi_1 x_1 + \varphi_2 x_2 + \varphi_3 x_3 + \varphi_4 x_1 x_2 + \varphi_5 x_1 x_3 + \varphi_6 x_2 x_3 + \varphi_7 x_1 x_2 x_3 \quad 1$$

де :

T – температура займання, °C або втрата маси, %;

$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7$ – коефіцієнти регресії;
 x_1, x_2, x_3 – параметри, що враховують вибрані фактори (ортофосфорної, карбаміду, діамонійфосфату відповідно).

Надалі ми побудували матрицю планування експерименту за стандартом кодування факторів: «+» — верхній рівень (максимальне значення); «-» — нижній рівень (мінімальне значення) (таблиця 3).

Таблиця 3

Матриця планування повного факторного експерименту для побудови математичної моделі

Номер експерименту	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Варіюючи трьома факторами та враховуючи план-матриці повнофакторного експерименту ми провели 8 експериментів для визначення втрати маси та 8 експериментів для визначення

температури займання, в результаті чого отримали числові значення температури і маси у досліджуваних взірцях (таблиця 4).

Таблиця 4

Результати експериментів з визначення температури займання та втрати маси

Назва показника	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура само-займання, °C	273	322	224	333	264	319	255	339
Втрата маси, %	10,5	10,9	7,5	12,4	5,5	12,4	5,9	11,4

Для обчислення коефіцієнтів регресії для трьох факторів у 2 рівнях використано формули 2-9.

$$\varphi_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad (2)$$

$$\varphi_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 \tau_i, \quad (6)$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 \tau_i, \quad (3)$$

$$\varphi_5 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 \tau_i, \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 \tau_i, \quad (4)$$

$$\varphi_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 \tau_i, \quad (5)$$

$$\varphi_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 \tau_i, \quad (8)$$

$$\varphi_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 \tau_i, \quad (9)$$

де $N = 8$ – кількість експериментальних ситуацій згідно із планом експерименту;

x_i – значення параметра згідно із матрицею плану (± 1);

τ_i – значення (температури або втрата маси).

На основі даних, отриманих в ході проведення експериментів та обчислень, згідно з формулами 2-9 отримано коефіцієнти регресії для втрати маси (таблиця 5) та температури займання (таблиця 6). Ці коефіцієнти подано в натуральному вигляді.

Таблиця 5

Коефіцієнти регресії для втрати маси

Коефіцієнт	φ_0 ,	φ_1 ,	φ_2 ,	φ_3 ,	φ_4 ,	φ_5 ,	φ_6 ,	φ_7
%	499	-60	-312	83	47	-27	-40	22

Таблиця 6

Коефіцієнти регресії для температури займання

Коефіцієнт	φ_0 ,	φ_1 ,	φ_2 ,	φ_3 ,	φ_4 ,	φ_5 ,	φ_6 ,	φ_7
T	499	-60	-312	83	47	-27	-40	22

Враховуючи отримані коефіцієнти регресії, запишемо залежність впливу відсоткового масового значення (формула 1) фосфатної кислоти (f), карбаміду (k) та діамонійфосфату (d) на температуру займання у вигляді:

$$T = 291,1 + 37,2x_1 - 3,4x_2 + 3,1x_3 + 11,2x_1x_2 - 2,4x_1x_3 + 6,1x_2x_3 - 3,9x_1x_2x_3. \quad (10)$$

Залежність впливу відсоткового масового значення (формула 1) фосфатної кислоти (f), карбаміду (k) та діамонійфосфату (d) на втрату маси матиме вигляд:

$$m = 9,56 + 2,21x_1 - 0,26x_2 - 0,76x_3 + 0,39x_1x_2 + 0,89x_1x_3 + 0,11x_2x_3 - 0,74x_1x_2x_3. \quad (11)$$

Коефіцієнт детермінації для отриманих регресійних залежностей становить 0,98, що добре відтворює варіацію як за значенням температури займання, так і за відсотковою втратою маси дослідних взірців.

Перевірку адекватності моделі, що відповідає рівнянню регресії виконано за допомогою критерію Фішера. Проведений аналіз відносних відхилень результатів експериментальних досліджень показав, що середня відносна похибка для показника втрати маси становить 1,81 %, а для температури займання — 0,49 %. Це свідчить про високу точність і повторюваність результатів. Дисперсійний аналіз, проведений з використанням критерію Фішера, показав, що розраховані значення F для втрати маси та температури займання у більшості експериментів не перевищують критичного значення ($F_{кр} = 3,47$ при $\alpha = 0,05$). Це свідчить про відсутність статистично значущих відмінностей між дисперсіями.

Використовуючи отримані регресійні залежності ми побудували відповідні поверхні дисперсії температури займання при варіації складу трьох основних компонентів: ортофосфорної кислоти, карбаміду та діамонійфосфату, які показані на рисунку 4.

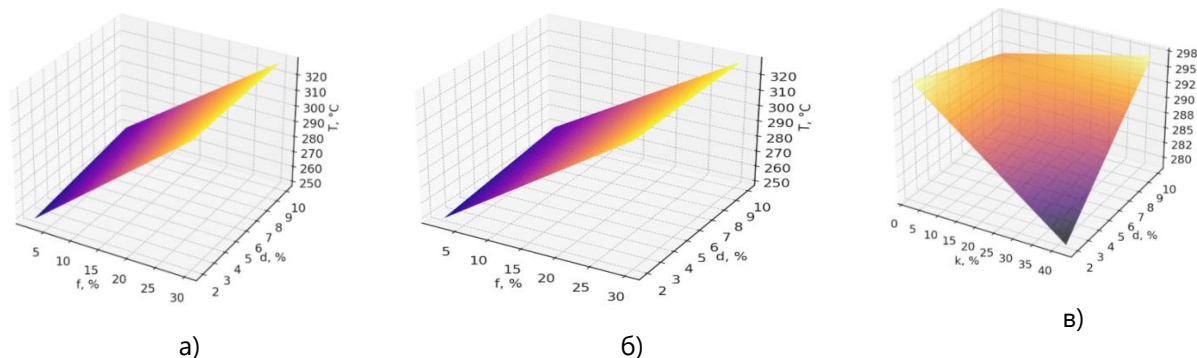


Рисунок 4 – Дисперсія температури займання дослідного зразка при:

а) середньому значенні діамонійфосфату (фактор d) та варіації інших факторів; б) середньому значенні карбаміду (фактор k) інших факторів; в) середньому значенні ортофосфорної (фактор f) кислоти та варіації інших факторів

Результати вказують на те, що за певних співвідношень цих компонентів досягається підвищення температури займання, що свідчить про посилення вогнезахисного ефекту.

На рисунку 5 зображені відповідні поверхні дисперсії втрати маси при варіації складу трьох основних компонентів: ортофосфорної кислоти, карбаміду та діамонійфосфату.

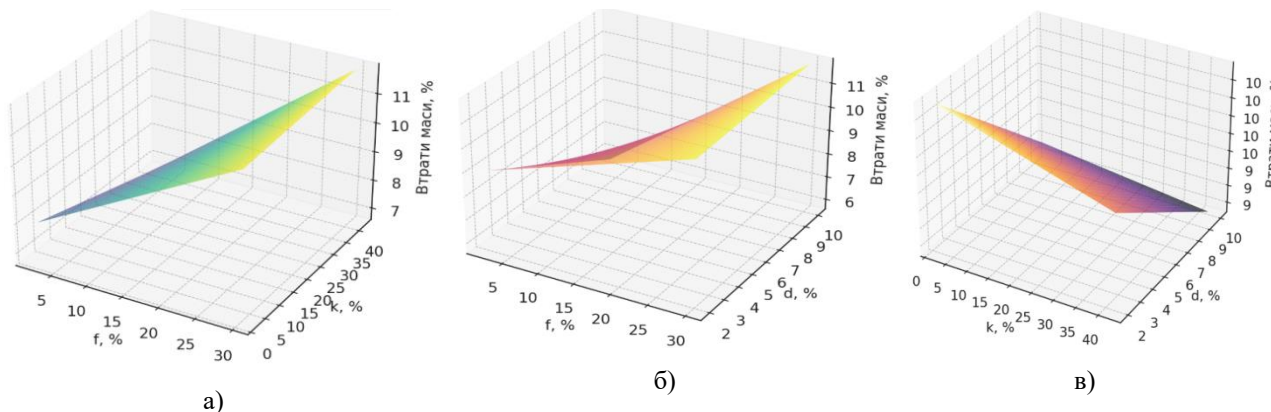


Рисунок 5 – Дисперсія втрати маси дослідного зразка при:

а) середньому значенні діамонійфосфату (фактор d) та варіації інших факторів; б) середньому значенні карбаміду (фактор k) та варіації інших факторів; в) середньому значенні ортофосфорної (фактор f) кислоти та варіації інших факторів.

Проведеним аналізом сформованих поверхонь виявлено, що найменша втрата маси досягається при гармонійному поєднанні кислоти та діамонійфосфату.

Висновки. Результати моделювання підтверджують наявність як синергетичних, так і антагоністичних ефектів між компонентами вогнебіозахисного розчину. Синергетичні ефекти демонструють розчини з карбомідом і діамонійсульфатом, а антагоністичні – з сульфатом амонію і ортофосфорною кислотою. Правильно підібране співвідношення дозволяє досягти підвищення температури займання та зниження втрати маси, що безпосередньо впливає на покращення вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій.

На підставі аналізу даних експериментальних досліджень, рівняння регресії і графічних залежностей визначено співвідношення масового складу вогнезахисної речовини, що здатна забезпечити вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисних засобів, а саме: діамонійфосфат – 4%, карбамід – 6%, фосфатна кислота 12%, вода 78%.

Список літератури:

1. ДСНС України. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 2020–2024 роки [Електронний ресурс]. Київ, 2025. URL: <https://dsns.gov.ua/statystichni-dovidki> (дата звернення: 03.05.2025).
2. Про затвердження Правил з вогнезахисту: наказ Міністерства внутрішніх справ України від 26 груд. 2018 р. № 1064. Офіційний вісник України. 2019. № 26. Ст. 2214.

3. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їх визначення. Класифікація. Чинний від 01.01.2020. Київ, УкрНДНЦ, 2020. 75 с.

4. МВС України. Правила пожежної безпеки в Україні: наказ від 30 груд. 2014 р. № 1417 [Електронний ресурс]. URL: zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text (дата звернення: 03.05.2025).

5. ІДУ НД ЦЗ. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 міс. 2020 року [Електронний ресурс]. Київ, 2024. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh/analitichni-materiali> (дата звернення: 24.02.2025).

6. Гаврилюк А. Ф., Гайдук М. О., Дуленко Д. І. Дослідження впливу взаємозаміни вогнезахисного засобу на зниження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій. Пожежна безпека. 2021. № 39. С. 12–20. DOI: 10.32447/20786662.39.2021.02.

7. Гаврилюк А. Ф., Гайдук М. О. Експериментальне дослідження показників вогнезахисної ефективності дерев'яних будівельних конструкцій при заміні вогнезахисного засобу. Пожежна безпека. 2024. № 45. С. 18–28. DOI: 10.32447/20786662.45.2024.03.

8. Жартовський В. та ін. Речовини вогнезахисні водорозчинні для деревини. Загальні технічні вимоги та методи випробування. Офіц. вид. Чинний від 01.10.2006.

Київ: Держспоживстандарт України, 2006. III, 17 с. (Національний стандарт України).

9. Цапко Ю. В., Ломага В. В., Цапко О. Ю. Вогнезахист деревини органо-неорганічними композиціями: монографія. Київ: Ямчинський О. В., 2023. 159 с. ISBN 978-617-8282-53-0.

10. Добростан О. В. Підвищення ефективності вогнезахисту дерев'яних конструкцій дахів водними вогнебіозахисними речовинами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Черкаси: Акад. пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 2013. 19 с.

11. Чернуха А. А. Підвищення ефективності вогнезахисту деревини за допомогою гелеутворюючих складів на основі силікатів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Харків: Нац. ун-т цив. захисту України, 2013. 20 с.

12. Цапко Ю. В., Цапко О. Ю. Встановлення механізму та вогнезахисної ефективності деревини, обробленої просочувальним розчином та покриттями. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2017. № 3. С. 50–55. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102393.

13. Цапко Ю. В., Ломага В. В., Цапко О. Ю. Багатофакторний метод оцінювання ефективності вогнезахисту деревини. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2022. Т. 13. № 1. С. 72–80.

14. Che W., Li Z., Huo S., Dinh T., Hong M., Maluk C., Yu Y., Xie Y. Fire-retardant anti-microbial robust wood nanocomposite capable of fire-warning by graded-penetration impregnation. *Composites Part B: Engineering*. 2024. Vol. 280. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111482.

15. Цапко Ю. В., Пінчевська О. О., Цапко О. Ю. Встановлення умов застосування вогнезахисної деревини на об'єктах різного призначення. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2019. № 29(2). С. 99–102. DOI: 10.15421/40290220.

16. Costes L., Laoutid F., Brohez S., Dubois P. Bio-based flame retardants: when nature meets fire protection. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2017. Vol. 117. P. 1–25. DOI: 10.1016/j.mser.2017.04.001.

References:

1. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2025). *Analitchna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 2020-2024 roky* [Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 2020-2024]. <https://dsns.gov.ua/statisticni-dovidki> [in Ukrainian].

2. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. (2018). *Pro zatverdzhennia Pravyl z vohnezakhystu* [On the approval of fire protection rules] (Nakaz No. 1064). *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*, 26, 2214 [in Ukrainian].

3. UkrNDNTs. (2020). *Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i*

materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia [Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods for their determination. Classification] (DSTU 8829:2019). *Derzhspozhyvstandart Ukrainy* [in Ukrainian].

4. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. (2014). *Pravyla pozhezhnoi bezpeky Ukrainy* [Fire safety rules of Ukraine] (Nakaz No. 1417). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text> [in Ukrainian].

5. Instytut derzhavnoho upravlinnia ta naukovykh doslidzen z tsyvilnoho zakhystu. (2024). *Analitchna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misyatsiv 2020 roku* [Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 12 months of 2020]. <https://idundcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh/analitichni-materiali> [in Ukrainian].

6. Havryliuk, A. F., Haiduk, M. O., & Dulenko, D. I. (2021). Doslidzhennia vplyvu vzaiemozamy vohnezakhysnoho zasobu na znyzhennia pokaznykiv vohnezakhysnoi efektyvnosti derevianykh budivelnykh konstruksii [Study of the impact of replacing fire-retardant agents on reducing the fire protection efficiency of wooden building structures]. *Pozhezhna bezpeka*, 39, 12–20. doi.org/10.32447/20786662.39.2021.02 [in Ukrainian].

7. Havryliuk, A. F., & Haiduk, M. O. (2024). Eksperymentalne doslidzhennia pokaznykiv vohnezakhysnoi efektyvnosti derevianykh budivelnykh konstruksii pry zamini vohnezakhysnoho zasobu [Experimental study of the fire protection efficiency indicators of wooden building structures when replacing fire-retardant agents]. *Pozhezhna bezpeka*, 45, 18–28. <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.03> [in Ukrainian].

8. Zhartovskyy, V. (2006). *Rechovyny vohnezakhysni vodorozchynni dlya derevyny. Zahalni tekhnichni vymohy ta metody vyprovuvannya* [Water-soluble fire-retardant substances for wood. General technical requirements and test methods] (DSTU). *Derzhspozhyvstandart Ukrainy* [in Ukrainian].

9. Tsapko, Y. V., Lomaha, V. V., & Tsapko, O. Y. (2023). *Vohnezakhyst derevyny orhano-neorhanichnyimi kompozytsiyami* [Fire protection of wood with organic-inorganic compositions]. *Yamchynskyy O. V. isbn.directory/book/9786178282530* [in Ukrainian].

10. Dobrostan, O. V. (2013). *Pidvyshchennia efektyvnosti vohnezakhystu derev'anykh konstruksiy dakhiv vodnymi vohnebiozakhysnymi rehovynami* [Improving the efficiency of fire protection of wooden roof structures with water-based fire-retardant substances] [Doctoral dissertation, Akademiia pozhezhnoi bezpeky im. Heroiv Chornobylya]. Cherkasy [in Ukrainian].

11. Chernukha, A. A. (2013). *Pidvyshchennya efektyvnosti vohnezakhystu derevyny za dopomohoyu helevtoryuyuchykh skladiv na osnovi sylikativ* [Improving the efficiency of wood fire protection using gel-forming compositions based on silicates] [Doctoral dissertation, Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy]. Kharkiv [in Ukrainian].
12. Tsapko, Y. V., & Tsapko, O. Y. (2017). Vstanovlennia mekhanizmu ta vohnezakhysnoi efektyvnosti derevyny, obrobenoi prosochuvalnym rozchynom ta pokryttiamy [Establishing the mechanism and fire protection efficiency of wood treated with impregnating solution and coating]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 3, 50–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102393> [in Ukrainian].
13. Tsapko, Y. V., Lomaha, V. V., & Tsapko, O. Y. (2022). Bahatofaktorny metod otsiniuvannia efektyvnosti vohnezakhystu derevyny [Multifactor method for evaluating the efficiency of wood fire protection]. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 13(1), 72–80 [in Ukrainian].
14. Che, W., Li, Z., Huo, S., Dinh, T., Hong, M., Maluk, C., Yu, Y., & Xie, Y. (2024). Fire-retardant antimicrobial robust wood nanocomposite capable of fire-warning by graded-penetration impregnation. *Composites Part B: Engineering*, 280, Article 111482. doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111482
15. Tsapko, Y. V., Pinchevska, O. O., & Tsapko, O. Y. (2019). Vstanovlennia umov zastosuvannia vohnezakhyschenoi derevyny na ob'ekтах riznoho pryznachennia [Establishing conditions for the use of fire-protected wood in objects of various purposes]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(2), 99–102. doi.org/10.15421/40290220 [in Ukrainian].
16. Costes, L., Laoutid, F., Brohez, S., & Dubois, P. (2017). Bio-based flame retardants: When nature meets fire protection. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 117, 1–25. doi.org/10.1016/j.mser.2017.04.001.

© А. Ф. Гаврилюк, М. О. Гайдук, 2025.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 15.05.25.

Прийнято до публікації 04.06.2025.