УДК 614.841.34

РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕКРАНУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОДЯНИХ ЗАВІС ВІД ПРОНИКНЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ФАКТОРІВ ПОЖЕЖІ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.52-64

Бенедюк В. С.*, ORCID iD 0000-0002-5109-5295
Стилик І. Г., ORCID iD 0000-0002-8474-2014
Тимошенко О. М., ORCID iD 0000-0001-7568-5030
Ліхньовський Р. В., ORCID iD 0000-0002-9187-9780
Онищук А. Є., ORCID iD 0000-0002-1829-126X
Присяжнюк В. В., ORCID iD 0000-0002-9780-785X
*E-mail: naanotek@ukr.net

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 15.10.2022
Пройшла рецензування: 09.11.2022

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежа, протипожежний захист, водяна завіса, щільність теплового радіаційного потоку, оптична щільність диму, концентрація небезпечних факторів пожежі, екранувальна здатність, технічні пристрої для створення водяних завіс

АНОТАЦІЯ

Наведено результати аналізу вимог нормативно-правових актів та нормативних документів щодо необхідності обробляння засобами вогнезахисту елементів горищних покриттів, дерев'яних конструкцій, матеріалів, що застосовуються у внутрішньому обладнанні під час будування та ремонту вагонів, текстильних матеріалів для виготовлення завіс, штор, оббивки диванів тощо. Досліджено суть класифікаційного методу випробувань визначення вогнезахисної ефективності, методу визначення групи горючості речовин і матеріалів, а також розглянуто вимоги щодо випробувань вогнезахисних засобів, які використовують у країнах Європейського Союзу. Проведено порівняння методів із визначення вогнезахисної ефективності вогнегасних матеріалів та групи горючості речовин і матеріалів. Здійснено випробування шести зразків вогнезахисних засобів. Встановлено відмінність у критеріях оцінки вогнезахисного засобу та групи горючості речовин і матеріалів, а саме – температури димових газів, часу самостійного горіння та тривалості випробування. З огляду на проведені дослідження виникає потреба в удосконаленні методу визначення вогнегасної здатності з обґрунтуванням необхідності фіксування температури димових газів, часу самостійного горіння (тління) та часу проведення випробувань.

Постановка проблеми. Автори у [1] розглянули висвітлені у чинній в Україні нормативній документації та інших джерелах доступної інформації питання щодо запобігання (зменшення) дії небезпечних факторів пожежі на людей, промислове обладнання, майно та конструкції будівель і споруд, зокрема через застосування водяних завіс. Наведено результати аналізу щодо ефективності водяних завіс з екранування від негативних впливів теплового випромінювання, проникнення диму, а також небезпечних газів як під час пожеж, так і локалізації й ліквідації інших, газонебезпечних, ситуацій та аварій. Окреслено актуальність та напрями, за якими планувалось проведення теоретичних та експериментальних досліджень з наведеного питання.

У цій статті, що є продовженням [1], наведено матеріали щодо отриманих результатів під час проведення лабораторних експериментальних досліджень водяних завіс щодо екранування від проникнення теплового випромінювання, диму та небезпечних газоподібних продуктів горіння, що

утворюються у разі виникнення пожеж. Зазначене буде використано під час підготовки і проведення натурних досліджень водяних завіс та розроблення рекомендацій щодо їх застосування у системах протипожежного захисту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з досліджуваного питання. У статті [2] автор з багаторічним досвідом досліджень у галузі водяних завіс розглянув процес формування на поверхні вертикальної протипожежної штори, що зрошується струменем розпиленої води, рухомої водяної плівки. Виконано теоретичний аналіз руху водяної плівки під дією сили тяжіння, наведено методику розрахунку її середньої товщини та швидкості руху залежно від інтенсивності зрошування. Теоретично розглянуто процес нагрівання водяної плівки тепловим випромінюванням інфрачервоного діапазону, характерного для типових осередків пожеж. Визначено ефективний сумарний коефіцієнт пропускання розпиленим струменем і водяною плівкою променистого теплового потоку та його залежність від основних фізичних і технічних параметрів. Зазначено, що теплове випромінювання є одним із найбільш небезпечних чинників, які супроводжують будь-яку пожежу. Воно загрожує здоров'ю та життю людей, обмежує зону активних дій рятувальних підрозділів. Розглянуто новітню схему колективного захисту від дії теплового випромінювання, в якій використано високоефективну екранувальну здатність суцільної водяної плівки. Вказано, що вода має сильну спектральну залежність показника поглинання, яка робить воду прозорою у видимому діапазоні (довжини хвиль 0,4–0,8 мкм) і непрозорою в інфрачервоному діапазоні, характерному для випромінювання під час пожеж (довжини хвиль 2–15 мкм). Завдяки цьому навіть тонка водяна плівка (товщиною менше 1 мм) може бути ефективним захисним екраном і непроникною перешкодою для теплового випромінювання.

У роботі [3] зазначено, що вимоги щодо застосування водяних завіс для протипожежного захисту об'єктів увійшли в зарубіжну практику, наведено приклад використання водяної завіси із дренчерними зрошувачами для протипожежного захисту промислового об'єкта довжиною понад 71 м та висотою понад 23 м.

У джерелі [4] наводиться аналіз гідравлічного розрахунку розподільного трубопроводу водяної завіси. Запропоновано удосконалення відомої із курсу гідравліки методики розрахунку трубопроводу з так званою попутною витратою рідини.

У статті [5] наведено результати досліджень впливу водяних струменів віялового типу на тепловий захист, зокрема пожежника-рятувальника під час пожежі. Стверджується, що мізерно малі збурювання на поверхні струменя під час виходу із насадки створюють поперечні коливання, що під дією сил поверхневого натягу і в'язкості рідини збільшуються та призводять до трансформації (розпадання) водяних струменів у повітрі. Разом із цим вказано, що для остаточного підтвердження теоретичних припущень щодо залежності одночасної дії сил поверхневого натягу і в'язкості води на стійкість струменя на межі «вода – повітря» необхідно провести додаткові експерименти.

У розділі Рекомендацій [6] Міжнародної Ради з великих електричних систем (CIGRE), присвяченому системам протипожежного захисту трансформаторних підстанцій, розміщених як у спорудах, так і на відкритому просторі, наведено, що водяні завіси розбризкують великі об'єми води вузьким потоком між сусідніми об'єктами, відсікаючи (екрануючи) їх від дії теплового випромінювання з боку палаючого об'єкта.

Автори статті [7] проаналізували особливості використання водяних завіс для захисту від теплового випромінювання пожежі об'єктів нафтогазового комплексу. Описується структура інтегрованої

діалогової системи, що містить електронну таблицю Microsoft Office Excel та сімейство макросів на Visual Basic for Applications. Це дає змогу на основі розгалуженого алгоритму розрахунку теплового режиму відкритої пожежі на об'єкті нафтогазового комплексу вичислити товщину водяної завіси і необхідну витрату води.

У [8] наведено ефективність застосування водяних завіс на нафтогазовому терміналі, у транспортному тунелі та на інших відкритих просторах, а також новий метод обчислення діаметра краплі водяної завіси, розрахунок коефіцієнта пропускання водяної завіси.

Також у [9] йдеться про використання тонкорозпиленої водяної завіси для запобігання поширенню диму, чадного газу, температури. Відповідно до результатів водяна завіса може бути ефективною у запобіганні від небезпечних факторів пожежі на ранніх її стадіях. Крім того, досліджено вплив форсунок з різними технічними характеристиками розпилення.

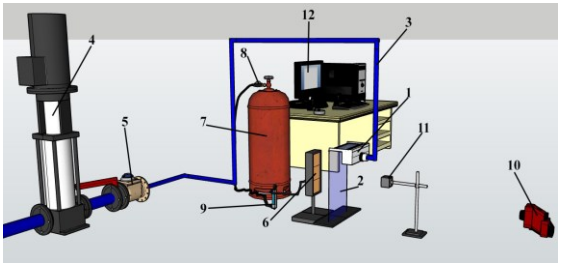
Таким чином, з огляду на аналіз зазначеного питання можна стверджувати, що на сьогодні роботи стосовно досліджень водяних завіс для застосування в системах протипожежного захисту тривають як в Україні, так і за кордоном, а зміст досліджень підтверджує їхню актуальність.

Формулювання цілей досліджень. За мету ставилось висвітлення отриманих результатів лабораторних експериментальних досліджень щодо ефективності екранування водяних завіс від проникнення: теплового радіаційного потоку, диму і двох небезпечних та найбільш поширених газів, що утворюються під час пожеж, – легшого за повітря, малорозчинного у воді, оксиду вуглецю (II) (далі – CO) та важчого за повітря, добре розчинного у воді, оксиду вуглецю (IV) (далі – CO_2). Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

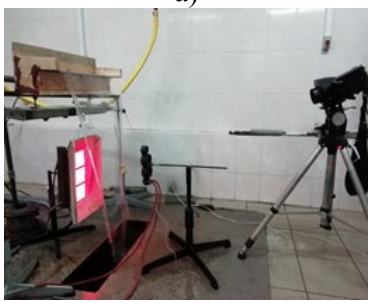
- визначення ефективності екранування водяних завіс від проникнення теплового радіаційного потоку за різних технологічних параметрів (витрата води, товщина водяного суцільно спадаючого потоку тощо);
- визначення ефективності екранування водяних завіс від проникнення диму за різних технологічних параметрів (витрата води, товщина водяного суцільно спадаючого потоку тощо);
- визначення ефективності екранування водяних завіс від проникнення CO та CO_2 за різних технологічних параметрів (витрата води, товщина водяного суцільно спадаючого потоку тощо).

Методи дослідження. В роботі було використано аналітичний та емпіричний методи дослідження ефективності екранування водяних завіс, що дало можливість досягти визначеної у статті мети.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження з визначення показника екранування від проникнення теплового радіаційного потоку крізь суцільну водяну завісу виконувались на лабораторному стенді, принципова 3D-схема та загальний вигляд якого наведені на рис. 1.



а)



б)

Рисунок 1 – Принципова 3D-схема (а); загальний вигляд лабораторного стенда для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення теплового радіаційного потоку крізь суцільну водяну завісу (б)

Джерело: розробка авторів

Лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення теплового радіаційного потоку крізь суцільну водяну завісу (далі – лабораторний стенд) складається з: водозливу 1, що формує суцільну водяну завісу 2, яка вільно спадає згори донизу під дією сили земного тяжіння (далі – завіса).

Схематичний устрій водозливу як поперечний розріз згідно з [10], який було взято за основу під час створення лабораторного стенда, наведено на рис. 2.

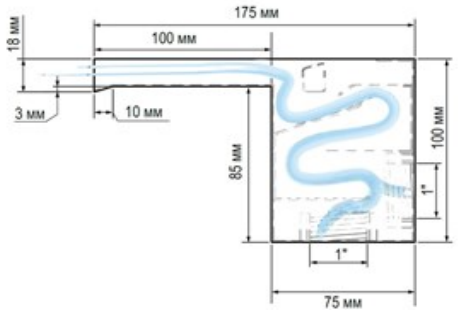


Рисунок 2 – Схематичний устрій водозливу
Джерело: розробка авторів

Водозлив 1 має живильний трубопровід 3. Необхідна (розрахункова теоретична) товщина суцільної завіси (далі – товщина завіси), що визначається витратою води з водозливу, забезпечується регулюванням продуктивності водяного насоса 4, яка вимірюється витратоміром води 5.

Тепловий радіаційний потік створюється за допомогою радіаційної газової панелі 6, яка розміщена перед завісою 2. Радіаційна газова панель 6 під'єднана до балона 7 зі скрапленою пропан-бутановою сумішшю. Тиск газоподібної суміші, що подається до радіаційної газової панелі 6 регулюється та вимірюється за допомогою газового редуктора 8, а витрата газу регулюється та вимірюється за допомогою ротаметра 9. Температура сотової керамічної пластини радіаційної газової панелі 6, що нагрівається під час горіння пропан-бутанової суміші, вимірюється дистанційно за допомогою тепловізора 10. Величина щільності теплового радіаційного потоку, що випромінюється сотовою керамічною пластиною, вимірюється за допомогою датчика щільності теплового потоку 11, який розміщений напроти радіаційної газової панелі 6 з іншого боку, за завісою 2.

Основні робочі параметри лабораторного стенда (величина щільності теплового радіаційного потоку, витрата води зі зливного пристрою, температура сотової керамічної пластини) фіксуються на персональному комп'ютері 12.

Засоби вимірювальної техніки, що використовуються під час проведення досліджень, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Засоби вимірювальної техніки, що використовуються під час проведення досліджень

Найменування ЗВТ	Діапазон вимірювань
Лінійка металева	від 0 мм до 1000 мм
Тепловізор TESTO 885-2	від 350°С до 1200°С
Датчик щільності теплового потоку	від 0,001 до 50,000 кВт/м^2
Секундомір СОСпр2а-2-000	від 0 до 3600 с
Витратомір води	від 0,1 м^3/год до 40 м^3/год
Барометр-анероїд М67	від 600 мм рт. ст. до 800 мм рт. ст.
Психрометр МВ-4М	від мінус 10 °С до 50 °С; від 10 % до 100 %

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень застосовується метод прямого вимірювання величини щільності теплового потоку, що проник крізь завісу, за різних значень її товщини та величини щільності теплового потоку без застосування завіси.

Показник екранування від проникнення теплового потоку крізь завісу $H_{m.n.}$ *(%)* визначається за формулою:

$$H_{m.n.} = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де: I_1 – виміряна щільність теплового потоку без застосування завіси, кВт/м^2;

I_2 – виміряна щільність теплового потоку із застосуванням завіси, кВт/м^2.

Товщина завіси визначається за формулою:

$$B = \frac{Q \cdot 10^3}{L \cdot \sqrt{2gH}}, мм \quad (2)$$

де: Q – продуктивність водяного насоса (витрата води з водозливу), м^3/с;

g – прискорення вільного падіння, g = 9,8 м/с^2;

H – відстань від низу водозливу по висоті завіси до точки визначення її товщини, м;

L – ширина завіси у точці визначення її товщини, м.

Послідовність проведення експериментальних досліджень була такою. Радіаційну газову панель 6 та датчик щільності теплового потоку 11 розміщували на мінімально безпечних відстанях щодо завіси 2, не допускаючи потрапляння на них крапель води. Вмикали радіаційну газову панель 6 та розігрівали її сотову керамічну пластину до температури (1000 ± 50) ºС і після стабілізації температури (за показами тепловізора 10) датчиком щільності теплового потоку 11 фіксували величину щільності теплового потоку, без застосування завіси 2.

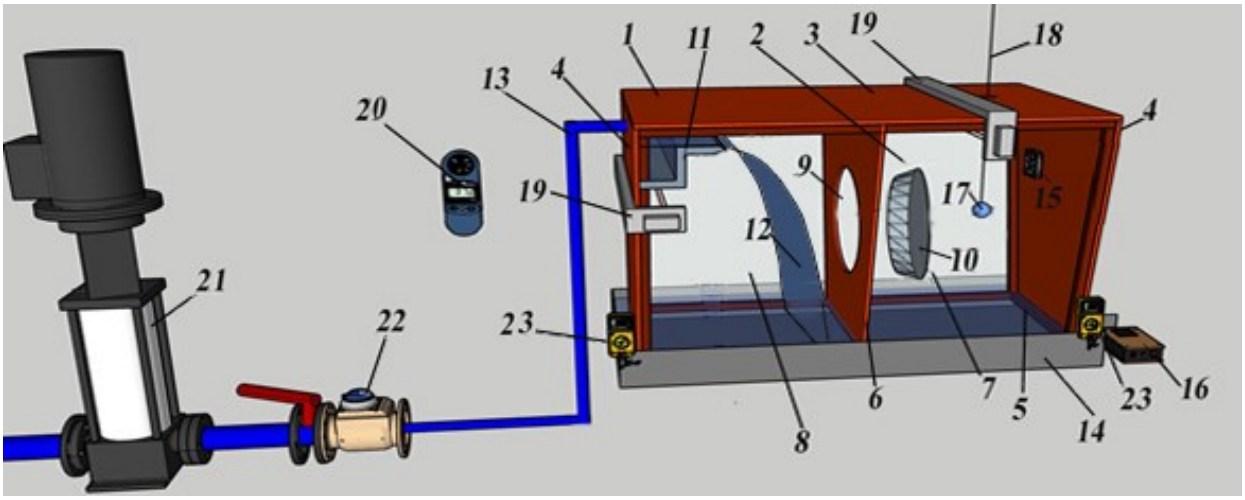
Аналогічно фіксували величину щільності теплового потоку із завісою 2, для різних витрат води з водозливу (для різних товщин завіси), не змінюючи інших попередніх робочих параметрів лабораторного стенда.

Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень наведено в табл. 2, де вказано середньоарифметичні значення виміряних та розрахованих показників із трьох дослідів щодо кожного експерименту..

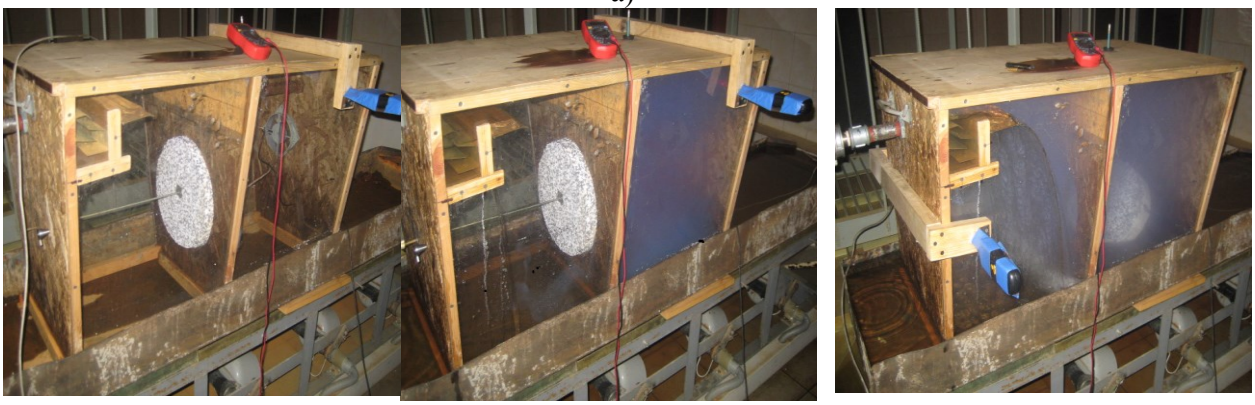
Таблиця 2 – Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення теплового потоку крізь завісу

№ експерименту	Q, м^3/год	H, м	B, мм	I_1, кВт/м^2	I_2, кВт/м^2	$H_{т.в.}$, %
1	1,50	0,55	0,22	2,640	0,333	87,4
2	1,98	0,55	0,28	2,640	0,257	90,3
3	2,51	0,55	0,36	2,640	0,174	93,4
4	2,96	0,55	0,42	2,640	0,116	95,6
5	1,58	0,55	0,23	4,200	0,462	89,0
6	2,10	0,55	0,30	4,200	0,348	91,7
7	3,13	0,55	0,45	4,200	0,233	94,5
8	3,98	0,55	0,57	4,200	0,181	95,7

Експериментальні дослідження з визначення показника екранування від проникнення диму крізь завісу виконувались на лабораторному стенді, принципова 3D-схема, загальний вигляд якого та окремі робочі моменти під час проведення досліджень наведені на рис. 3.



а)



б) в) г)

Рисунок 3 – Принципова 3D-схема (а); загальний вигляд лабораторного стенда для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення диму крізь завісу (б); робочий момент створення задимлення у «загазованому відсіку» (в); робочий момент вимірювання прозорості задимленого середовища, що створене димом, який проник у «чистий відсік» крізь завісу за відкритої заглушки стенда (г)

Джерело: розробка авторів

Лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення диму через суцільну водяну завісу (далі – лабораторний стенд) складається із: прозорого корпусу (монолітний полікарбонат) 1, двох протилежних (повздовжніх) стінок 2, верху 3, боковин 4. Низ 5 корпусу відкритий. Всередині корпусу виконана стінка 6, що поділяє корпус 1 на два рівних за об'ємом відсіки з умовними назвами: «загазований відсік» 7 та «чистий відсік» 8. У стінці 6 виконано отвір 9 діаметром 300 мм, оснащений заглушкою 10. На стінці 4 відсіку 8 змонтовано водозлив 11, що формує завісу 12. Схематичний устрій водозливу 11 наведено на рис. 2. Водозлив 11 має живильний трубопровід 13 для подавання води. У робочому стані корпус 1 занурений у воду в металевому піддоні 14 на глибину (100 ±10) мм. Таким чином, герметичність корпусу 1 загалом та герметичність відсіків 7, 8 зокрема щодо навколишньої атмосфери та між собою (за закритої заглушки 10) забезпечується: герметичністю конструктивних елементів та стикових з'єднань між ними, а знизу – водяною подушкою.

Під час досліджень у відсіку 7 створюється задимлене середовище, наприклад димовою шашкою 17, оснащеною запальним гнітом. Підпалена димова шашка 17 під час проведення задимлення відсіку 7 підвішується доверху

корпусу 1 за допомогою підвісу 18.

Усередині відсіку 7 розміщено електричний вентилятор 15, що призначений для перемішування газового середовища (диму) за закритої заглушки 10 і для створення потоку газового середовища (диму) у бік відсіку 8 та завіси 12 за відкритої заглушки 10. Електричний вентилятор 15 оснащений регулятором обертів 16 для регулювання швидкості потоку газового середовища у межах (0,5 ± 0,1) м/с. Контроль концентрації диму під час роботи лабораторного стенда виконується за допомогою комплексу для вимірювання прозорості газового середовища 19, який розміщують зовні прозорих стінок 2 кожного із відсіків 7, 8.

Швидкість потоку газового середовища (диму) перед завісою 12, що створюється вентилятором 15, визначається цифровим анемометром 20 заздалегідь, перед проведенням досліджень.

Необхідна товщина завіси забезпечується регулюванням продуктивності водяного насоса 21, яка вимірюється витратоміром 22.

Засоби вимірювальної техніки, що використовуються під час проведення лабораторних експериментальних досліджень, наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Засоби вимірювальної техніки, що використовуються під час проведення лабораторних експериментальних досліджень

Найменування ЗВТ	Діапазон вимірювань
Лінійка металева	від 0 мм до 1000 мм
Міліамперметр мультиметра Lini-T UT33C	від 0 мА до 200 мА
Барометр-анероїд М67	від 600 мм рт. ст.до 800 мм рт. ст.
Психрометр МВ-4М	від мінус 10 °С до 50 °С; від 10% до 100%
Цифровий анемометр AR 856	від 0,3 м/с до 45,0 м/с

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень застосовується розрахунковий метод визначення оптичної щільності газового середовища за результатами опосередкованого (непрямого) вимірювання прозорості задимленого середовища у «чистому відсіку» стенда, яка є меншою від прозорості чистого повітря внаслідок проникнення диму із «задимленого відсіку» без застосування завіси та крізь завісу за різних значень її товщини.

Показник (коефіцієнт) екранування від проникнення диму через завісу H_{∂} *(%)* визначається за формулою:

$$H_{\partial} = \frac{D_1 - Di}{D_1} \cdot 100\%, \qquad (3)$$

де: D_1 – максимальна оптична щільність диму в «чистому відсіку», що не захищений завісою;

D_i – максимальна оптична щільність диму в «чистому відсіку», що захищений завісою.

Оптична щільність диму D_i визначається за показами міліамперметра комплексу вимірювання прозорості газового середовища за формулою:

$$D_i = \lg \frac{I_0}{I_{\partial i}}, \qquad (4)$$

де: I_o – значення показів міліамперметра комплексу вимірювання прозорості газового середовища у незадимленому середовищі (чисте повітря), мА;

$I_{ді}$ – значення показів міліамперметра комплексу вимірювання прозорості газового середовища у задимленому середовищі (через кожні 30 с з початку експерименту), мА.

Товщина завіси (*B*, мм) визначається за формулою (2).

Продуктивність водяного насоса (витрата води з водозливу) *Q* *(*$м^3/с$*)* визначається за допомогою витратоміра води.

Послідовність проведення досліджень була такою. На «загазованому відсіку» 7 встановлювали комплекс для вимірювання прозорості газового середовища 20 та розпочинали заповнення відсіку 7 димом. У разі досягнення показів міліамперметра 23 величини (8,0 ± 0,1) мА* подавання диму закінчували. Вмикали вентилятор 15. Давали витримку протягом не менше 120 с для того, щоб дим рівномірно розподілився в об'ємі відсіку 7, після чого остаточно фіксували покази міліамперметра 23. Потім встановлювали комплекс для вимірювання прозорості газового середовища 20 на відсіку 8 та впевнювалися, що покази його міліамперметра відповідають показам для незадимленого середовища (чистого повітря). Після цього у передбачений конструкцією стенда дистанційний спосіб відкривали заглушку 10. Розпочинали фіксацію показів міліамперметра через кожні 30 с до досягнення стабілізації значення показника у часі – (15 ± 2) мА, що свідчило про рівномірне розподілення диму у відсіках 7, 8 і насамкінець завершували роботу – вимикали стенд та провітрювали відсіки 7, 8.

Примітка. Наведена величина сили струму (8,0 ± 0,1) мА відповідає досягнутій у відсіку (згідно з формулою (4) – $D_i = lg\ 20/8 = 0,4$) середовища оптично щільного диму (згідно з класифікацією). Для порівняння: оптична щільність світлофільтрів захисних масок газо-, електрозварювальників для різних марок скла перебуває у межах від 0,5 до 4,5.*

Аналогічно виконували дослідження із застосуванням завіси 12, яку вмикали заздалегідь, перед відкриттям заглушки 10. Фіксацію показів міліамперметра 23 також виконували через кожні 30 с до стабілізації певного значення показника у часі. Дослідження проводили для різних витрат води з водозливу (для різної товщини завіси).

Результати лабораторних експериментальних досліджень наведено у табл. 4, де вказано середньоарифметичні значення виміряних та розрахованих показників із трьох дослідів щодо кожного випробування. Обробка результатів виконувалась за формулами 2, 3, 4. Зведені результати досліджень наведено графічно на рис. 4.

Таблиця 4 – Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта екранування від проникнення диму крізь завісу

	Тривалість експерименту, хв								
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Показники середовища у «чистому відсіку», що не захищене завісою, мА, та оптична щільність задимленого середовища									
Покази міліамперметра, мА	22,2	18,5	16,8	15,7	15,2	15,1	15,2	15,3	15,4
Оптична щільність середовища D_i	0,00	0,08	0,12	0,15	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16
Показники середовища у «чистому відсіку», що захищене завісою (витрата води 0,87 л/с, товщина завіси 0,5 мм), мА, та оптична щільність задимленого середовища									
Покази міліамперметра, мА	22,0	19,6	17,1	14,2	15,9	16,2	16,1	16,1	16,2
Оптична щільність середовища D_i	0,00	0,05	0,11	0,15	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13
Показники середовища у «чистому відсіку», що захищене завісою (витрата води 1,74 л/с, товщина завіси 1,0 мм), мА, та оптична щільність задимленого середовища									
Покази міліамперметра, мА	22,1	20,1	18,0	17,1	16,4	16,7	16,7	16,7	16,7
Оптична щільність середовища D_i	0,00	0,04	0,09	0,11	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11
Показники середовища у «чистому відсіку», що захищене завісою (витрата води 3,48 л/с, товщина завіси 2,0 мм), мА, та оптична щільність задимленого середовища									
Покази міліамперметра, мА	22,0	19,1	17,9	17,1	16,6	16,9	17,2	17,2	17,2
Оптична щільність середовища D_i	0,00	0,06	0,09	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11

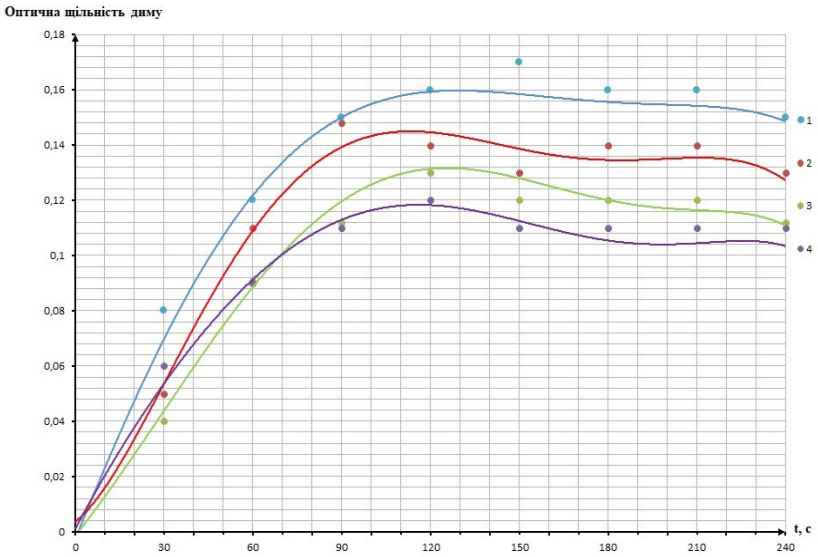


Рисунок 5 – Залежності оптичної щільності задимленого середовища за завісою від товщини завіси:
1 – оптична щільність диму в «чистому відсіку», що не захищений завісою;
2 – оптична щільність диму в «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с (товщина завіси 0,5 мм). Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення диму крізь завісу $H_д$ = 12,5%;
3 – оптична щільність диму у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с (товщина завіси 1,0 мм). Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення диму крізь завісу $H_д$ = 18,8%; 4 – оптична щільність диму в «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с (товщина завіси 2,0 мм). Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення диму крізь завісу $H_д$ = 25,0 %

Джерело: розробка авторів

Експериментальні дослідження з визначення показника екранування від проникнення газоподібних CO та CO_2 крізь завісу виконувались на лабораторних стендах, за основу яких взято конструкцію, що наведена на рис. 3. Водночас лабораторні стенди було оснащено системами подавання газоподібних: CO (газ отримували одним із відомих лабораторних способів – через хімічне розкладання мурашиної кислоти під час нагрівання у суміші з концентрованою сірчаною кислотою) та CO_2 (подавали з балона зі скрапленим CO_2), а також двома газоаналізаторами Testo 310 для визначення у відсіках 7 та 8 об'ємної концентрації наведених газів під час досліджень.

Загальний вигляд лабораторних стендів для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення крізь завісу CO та CO_2 наведено на рис. 6.



а) б)

Рисунок 6 – Загальний вигляд лабораторних стендів для проведення експериментальних досліджень з визначення показника екранування від проникнення крізь завісу: а) CO; б) CO_2

Джерело: розробка авторів

Перед проведенням досліджень у відсіках 7 кожного із лабораторних стендів (за закритої заглушки 10) створювали робочі концентрації: CO – (4000 ± 40) ppm, CO_2 – (10 ± 1) %, які вибрані за умови того, що згідно із джерелами у разі перевищення таких концентрацій цих газів у повітрі відбувається отруєння людей і тварин із подальшим летальним кінцем. Впевнювалися, що концентрації CO та CO_2 у відсіках 8 мають нульові значення. Після цього у передбачений конструкцією стендів дистанційний спосіб відкривали заглушки 10. Розпочинали фіксацію показів збільшення концентрації газів у відсіку 8 через кожні 30 с до досягнення величин: для CO – (2000 ± 20) ppm і для CO_2 – (5,0 ± 0,5) %, що свідчило про рівномірне розподілення газів у відсіках 7, 8. Подальші методи проведення досліджень аналогічні наведеним вище для досліджень з визначення показника екранування від проникнення диму крізь завісу.

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень застосовувався метод прямого вимірювання величин концентрацій CO та CO_2, що проникли у «чистий відсік» крізь завісу, за різних значень її товщини та величин концентрацій газів без застосування завіси.

Показник (коефіцієнт) екранування від проникнення газоподібних CO та CO_2 крізь завісу $H_{CO,\ CO2}$, (%) визначався за формулою:

$$Hco,co2 = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де: C_1 – максимальна концентрація газоподібних CO або CO_2 у «чистому відсіку», що не захищений завісою, %;

C_2 – максимальна концентрація газоподібних CO або CO_2 у «чистому відсіку», що захищений завісою, %.

Результати лабораторних експериментальних досліджень для CO наведено у табл. 5, для CO_2 – у табл. 6, де вказано середньоарифметичні значення виміряних показників із трьох дослідів щодо кожного випробування. Обробка результатів виконувалась за формулами 2, 5. Зведені результати досліджень наведено графічно на рис. 7, 8.

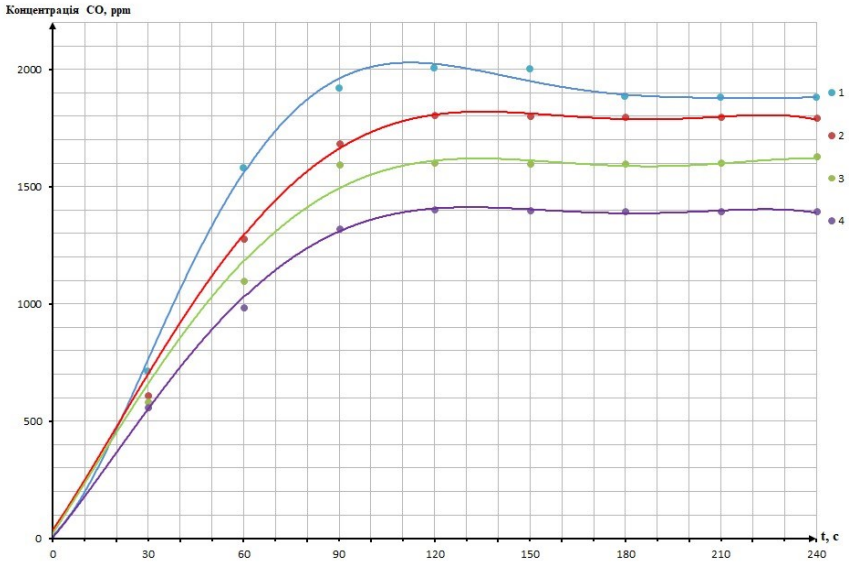


Рисунок 7 – Залежності концентрації CO, що проник крізь завісу, від товщини завіси
1 – концентрація CO у «чистому відсіку», що не захищений завісою, ppm.; 2 – концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с (товщина завіси 0,5 мм), ppm. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO крізь завісу HCO = 10%; 3 – концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с (товщина завіси 1,0 мм), ppm. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO крізь завісу HCO= 20%. 4 – концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с (товщина завіси 2,0 мм), ppm. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO крізь завісу HCO = 30%.

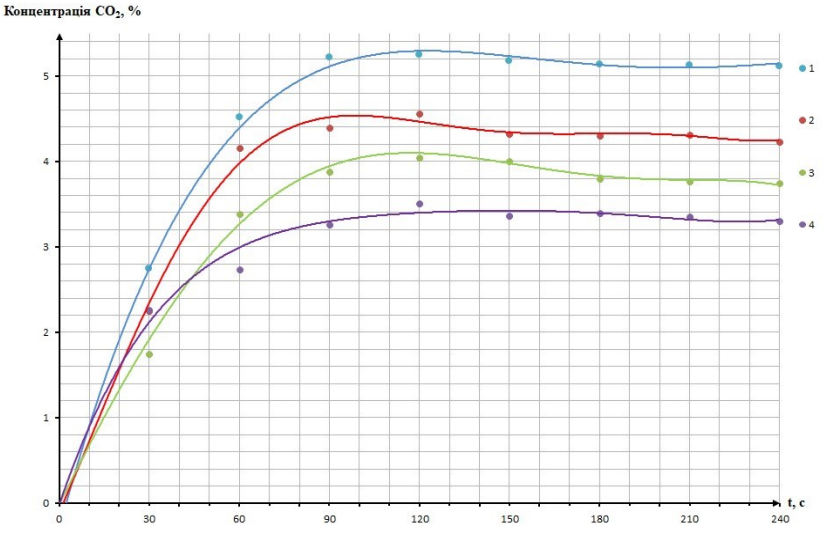
Джерело: розробка авторів

Таблиця 5 – Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта екранування від проникнення газоподібного CO крізь завісу

Тривалість експерименту, хв								
0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Концентрація CO у «чистому відсіку», що не захищений завісою, ppm								
0	712	1580	1920	2006	1895	1885	1881	1880
Концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с, (товщина завіси 0,5 мм), ppm								
0	611	1280	1684	1805	1802	1796	1797	1794
Концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с, (товщина завіси 1 мм), ppm								
0	581	1100	1594	1603	1600	1600	1602	1601
Концентрація CO у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с, (товщина завіси 2 мм), ppm								
0	560	984	1322	1404	1400	1395	1388	1390

Таблиця 6 – Зведені результати лабораторних експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта екранування від проникнення газоподібного CO_2 крізь завісу

Тривалість експерименту, хв								
0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Концентрація CO_2 у «чистому відсіку», що не захищений завісою, %								
0,00	0,95	4,52	5,22	5,25	5,18	5,14	5,13	5,11
Концентрація CO_2 у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с, (товщина завіси 0,5 мм),%								
0,00	0,92	4,16	4,39	4,56	4,32	4,30	4,31	4,23
Концентрація CO_2 у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с, (товщина завіси 1 мм), %								
0,00	1,75	3,38	3,88	4,04	4,00	3,80	3,77	3,75
Концентрація CO_2 у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с, (товщина завіси 2 мм), %								
0,00	2,26	2,74	3,26	3,51	3,36	3,49	3,35	3,20



P

Рисунок 8 – Залежності концентрації CO_2, що проник крізь завісу, від товщини завіси: 1 – концентрація CO_2 у «чистому відсіку», що не захищений завісою, %; 2 – концентрація CO_2 у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 0,87 л/с (товщина завіси 0,5 мм) %. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO_2 крізь завісу H_{CO2} = 13%; 3 – концентрація CO_2 у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 1,74 л/с (товщина завіси 1,0 мм) %. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO_2 крізь завісу H_{CO2} = 23%; 4 – концентрація CO_2 у «чистому відсіку», що захищений завісою з витратою води 3,48 л/с (товщина завіси 2,0 мм), %. Розрахунковий коефіцієнт екранування від проникнення газоподібного CO_2 крізьзавісу H_{CO2} = 33%

Джерело: розробка авторів

Висновки та напрями подальших досліджень. 1. Наведене стендове обладнання для проведення лабораторних досліджень екранувальної здатності водяних завіс від проникнення радіаційного теплового випромінювання, диму, небезпечних газоподібних продуктів горіння (CO та CO_2) має конструктивне виконання на рівні провідних аналогів та сучасне метрологічне забезпечення, що разом із розробленими методиками досліджень дає змогу проводити експериментальні дослідження на високому науково-технічному рівні з достовірними результатами.

2. Отримані результати експериментальних лабораторних досліджень свідчать про: високу ефективність завіс щодо екранувальної здатності від проникнення теплових потоків у інфрачервоному діапазоні довжин хвиль випромінювання (теплові потоки створювались за допомогою радіаційної газової панелі) – коефіцієнт екранування від 87% до 96% за товщини завіси від 0,22 мм до 0,57 мм; помірну ефективність щодо екранувальної здатності від проникнення диму, CO та CO_2 – коефіцієнт екранування від 10% до 33% за товщини завіси від 0,50 мм до 2,00 мм.

Незначний нахил графіків № 1 від горизонталі на ділянці часу досліджень від 2 хв до 4 хв, імовірно, пов’язаний з певною негерметичністю корпусу стенда, особливостями процесу перемішування середовища вентилятором, похибками вимірювань; нахил графіків № 2, № 3, № 4 – з негерметичністю відповідного відсіку стенда, похибками вимірювань, а також осадженням і вимиванням диму та газів завісою.

Прямого впливу показників ступеня розчинності у воді CO та CO_2 на коефіцієнти екранування від проникнення цих газів через завісу під час цих досліджень не встановлено.

3. Результати лабораторних досліджень у подальшому планується використати під час проведення натурних досліджень завіс.

4. Результати лабораторних та натурних випробувань будуть основою для розроблення рекомендацій щодо застосування завіс у системах протипожежного захисту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бенедюк В. С., Корнієнко О. В., Мельник В. П., Стилик І. Г., Тимошенко О. М. Шляхи та проблемні питання впровадження водяних протипожежних завіс в Україні. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. № 2(10). 2020. С. 22–31.
2. Виноградов А. Г. Теплозахисні властивості суцільної плівки води. *Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали міжнар. наук.-техніч. конференції*, 26 вер. 2021, Київ-Херсон. С. 214–216.
3. Дренчерные оросители производства Пожнефтехим для эффективных противопожарных водяных завес большой высоты. URL: https://neftegaz.ru/Analisis/equipment/328491-drenchernye-orositeli-proizvodstva-pozhneftekhim-dlya-effektivnykh-protivopozharnykh- vodyanykh-zaves/ (дата звернення : 17.08.2021).
4. Болдырев В. В. Гидравлический расчет водяных завес как трубопроводов с попутным расходом. *Водоснабжение и санитарная техника*. № 11. 2016. С. 64–70.
5. Гаврилко О. А., Білінський Б. О. Вплив водяних струменів віялового типу на тепловий захист під час пожеж. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2017. № 877. С. 33–37.
6. Guide for Transformer Fire Safety Practices. Working Group A2.33. Cigre, Paris, France. 2013. p. 139. URL : https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide_for_Transformer_FireSafety_ Practices.pdf (дата звернення : 26.08.2021).
7. Федоров А.В. и др. Огнезащита объектов нефтегазового комплекса на основе применения водяных завес. *Научно-аналитический журнал : Вестник.* № 3. 2017. С. 17–23.
8. Hui Zhong, Guohua Chen, Saihua Jiang. A novel method for evaluation of fire prevention by using water curtain with large droplets. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 43. 2016. P. 25–32.
9. Zhigang Wang, Xishi Wang, Yanqing Huang. Experimental study on fire smoke control using water mist curtain in channel. Journal of Hazardous Materials. Vol. 342. 2018. P. 231–241.
10. Излив водопада «Aquafall-1500» URL : http//www.fontanov.net@gmail.com (дата звернення : 10.03.2021).

REFERENCES

1. Benediuk, V. S., Korniienko, O. V., Melnyk, V. P., Stylyk I. H., Tymoshenko, O. M. (2020). Shliakhy ta problemni pytannia vprovadzhennia vodianykh protypozhezhnykh zavis v Ukraini [Ways and problems of implementation of water curtains in Ukraine] *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2, 22 – 31 [in Ukrainian].

2. Vynohradov, A. H. (2020). Teplozakhysni vlastyvosti sutsilnoi plivky vody [Thermal protective propertiesof a continuous film of water]. *Hidroaeromekhanika v inzhenernii praktytsi*, Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii [Hydromechanics in engineer practice, Proceedings of international science-technical Conference], Kyiv-Kherson [in Ukrainian].
3. Drenchernue orosytely proyzvodstva Pozhneftekhym dlia effektyvnukh protyvopozharnukh vodianukh zaves bolshoi vusotu [Deluge sprinklers manufactured by Pozhneftehim for effective high altitude fire fighting water curtains]. Retrived from https://neftegaz.ru/analisis/equipment/328491-drenchernye-orositeli-proizvodstva-pozhneftekhim-dlya-effektivnykh-protivopozharnykh-vodyanykh-zaves/ [in Russian].
4. Boldyirev, V. V. (2017). Gidravlicheskiy raschet vodyanyih zaves kak truboprovodov s poputnyim rashodom [Hydraulic calculation of water curtains as pipelines with associated flow]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tehnika*, 11, 64–70 [in Russian].
5. Havrylko, O. A., Bilinskyi B. O. (2017). Vplyv vodianykh strumeniv viialovoho typu na teplovyi zakhyst pid chas pozhezh [Effect of fan-type water jets on thermal protection during fires] *Visnyk natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika*. 877, 33–37. [in Ukrainian].
6. Guide for Transformer Fire Safety Practices. Working Group A2.33. Cigre, Paris, France. 2013. p.139. Retrived from https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide_for_Transformer_Fire_Safety_ Practices.pdf [in English].
7. Fedorov, A. V. i dr. (2017) Ognezaschita ob'ektov neftegazovogo kompleksa na osnove primeneniya vodyanyih zaves [Fire protection of objects of the oil and gas complex based on the use of water curtains]. *Nauchno - analiticheskiy zhurnal: Vestnik*. 3, 17–23 [in Russian].
8. Hui Zhong, Guohua Chen, Saihua Jiang. (2016). A novel method for evaluation of fire prevention by using water curtain with large droplets. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 43, 25–32 [in English].
9. Zhigang Wang, Xishi Wang, Yanqing Huang. (2018) Experimental study on fire smoke control using water mist curtain in channel. *Journal of Hazardous Materials,* 342, 231–241 [in English].
10. Izliv vodopada «Aquafall-1500» [The flow of the waterfall «Aquafall-1500»] Retrived from http//www.fontanov.net@gmail.com [in Russian].

RESULTS OF LABORATORY RESEARCH OF SHIELDING ABILITY OF WATER CURTAIN FROM PENETRATION OF DANGEROUS FACTORS OF FIRE

V. Benedyuk, I. Stylyk, O. Tymoshenko, R. Lihniovskii, A. Onyshcuk, V. Prysyazhnyuk
Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS:

fire, fire protection, water curtain, density of heat radiation flow, optical smoke density, concentration of dangerous factors of fire, shielding ability, technical devices for creation of water curtains

ANNOTATION

These materials are a continuation of previously published in the Scientific Bulletin «Civil Protection and Fire Safety» № 2(10) (2020) materials on water curtain research. This article presented materials of searching and analyzing the latest available publications on this subject, which showed, that research in the creation of effective fire protection systems, in particular, water curtains, are continued in Ukraine and abroad to date, which confirms their relevance and importance. It has been established that despite the wide range of practical applications of water curtains, in the normative documents of Ukraine the issues of necessity and possibility of their installation, technical requirements and peculiarities of their design, including regarding the duration of work, substantiation of cost characteristics, methods of their testing are insufficiently reflected and require additions and clarifications. Presented bench equipment for laboratory researches of shielding ability of water curtains from penetration: heat radiation flow, smoke, dangerous gaseous combustion products: carbon monoxide (II) – CO and carbon monoxide (IV) – CO_2 has a design at the level of leading analogs and modern metrological support, which, together with the developed research methods, allows to conduct experimental researches at a high scientific and technical level with reliable results. The obtained results of experimental laboratory researches showed high efficiency of curtains in terms of shielding ability from penetration: heat fluxes in the infrared range of radiation wavelengths (heat fluxes were created by a radiation gas panel) – shielding coefficient from 87% to 96%, with calculated (theoretical) thickness of curtains from 0.22 mm to 0.57 mm; and moderate efficiency in terms of shielding ability from smoke penetration (created by smoke bombs), CO and CO_2 (supplied in a gaseous state) – shielding coefficient from 10% to 33%, with the calculated (theoretical) thickness of the water curtain from 0.50 mm to 2.00 mm. The results of laboratory experimental researches will be used in conducting field researches of water curtains. The final results of laboratory and field researches will be the basis for the development of recommendations for using water curtains in fire protection systems.