

УДК 614.8

С. М. Бондаренко, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4687-1763)

М. М. Мурін, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-9898-0128)

І. В. Яковлев, слухач магістратури (ORCID 0000-0003-2802-3733)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ІНЕРЦІЙНОСТІ СПРАЦЬОВУВАННЯ СПРИНКЛЕРНИХ ЗРОШУВАЧІВ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ПОЖЕЖОГАСІННЯ

Отримано експериментальні дані інерційності спринклерних зрошувачів з температурою спрацьовування 57 °С з урахуванням швидкості наростання температури та отримана емпірична залежність часу спрацьовування спринклерного зрошувача з моменту виникнення пожежі. Це дозволяє оцінити застосування даного типу зрошувачів для захисту різних приміщень залежно від класу пожежної небезпеки. При виборі вихідних даних для проектування спринклерних автоматичних систем водяного пожежогасіння залежно від класу приміщень по пожежній небезпеці проглядається два підходи. Для приміщень класу ОН зі збільшенням пожежної небезпеки інтенсивність подачі вогнегасної речовини залишається постійної ($I_0 = 5$ мм/хв), а збільшується площа гасіння для розрахунку витрати води ($F_p = 72$ м² для ОН1, $F_p = 144$ м² для ОН2, $F_p = 216$ м² для ОН3, $F_p = 360$ м² для ОН4). Для приміщень ННР використовується інший підхід. При проектуванні спринклерної автоматичної системи водяного пожежогасіння розрахункова площа для визначення сумарної витрати води залишається постійної ($F_p = 260$ м²) а змінюється інтенсивність подачі вогнегасної речовини ($I_0 = 7,5$ мм/хв для ННР1, $I_0 = 10$ мм/хв для ННР2, $I_0 = 12,5$ мм/хв для ННР3). Однак, і перший підхід і другий мають на увазі, що площа гасіння пожежі залишається фіксованою величиною, а лінійна швидкість розвитку пожежі в явному виді ніде не враховується. Тому, одержання даних про час спрацьовування спринклерного зрошувача залежно від швидкості наростання температури пожежі в приміщенні, що захищається, дозволить визначити мінімальну площу зрошення осередку пожежі. Оптимальний вибір розрахункової площі для визначення витрати води при гасінні пожежі дозволить оптимізувати параметри гідравлічної розподільної мережі, вибір елементів системи, розрахувати ефективність застосування системи пожежогасіння.

Ключові слова: автоматична система водяного пожежогасіння, спринклерний зрошувач, інерційність спрацьовування, лінійна швидкість розвитку пожежі, розрахункова площа для витрати води

1. Вступ

Застосування спринклерних систем водяного пожежогасіння (СВПГ) забезпечує виявлення пожежі на ранній стадії з наступною її ліквідацією, що, у свою чергу, дозволяє уникнути значних матеріальних збитків як на промислових [1, 2] так і на цивільних об'єктах [3]. Ефективність застосування таких систем формується ще на стадії проектування. Процес горіння різних речовин має деякі загальні закономірності, однак, може кардинально різнитися по динаміці розвитку, а також по домінуючих факторах пожежі. Умови розвитку пожежі характеризуються видом пожежного навантаження й об'ємно-планувальними особливостями будівлі або приміщення, що захищається. З небезпечних факторів пожежі, по яких формується команда на запуск спринклерної СВПГ, є підвищення температури в приміщенні, що захищається.

Оскільки спринклерні СВПГ є системами локального гасіння, то успішне їхнє застосування визначається часом спрацьовування спринклерного зрошувача після чого починається подача вогнегасної речовини. Основним елементом системи, що робить значний внесок в підвищення її інерційності, є тепловий замок (колба) спринклера [4, 5].

Прогнозування підвищення температури в заданих межах досягається за допомогою математичного апарата, використовуючи детерміновані математичні моделі.

Найбільш достовірною математичною моделлю, що описує процеси розвитку пожежі та впливу на неї вогнегасної речовини [6] та системи вентиляції [7] є польова модель (computational fluid dynamics CFD), заснована на системі диференціальних рівнянь у частинних похідних. У такій постановці завдання одержання реальних значень параметрів розвитку пожежі в часі відноситься до класу NP складних завдань і її рішення вимагає значних обчислювальних ресурсів.

Для інженерних розрахунків параметрів спринклерної системи достатньо використовувати залежності, які враховують інформацію про зміну факторів на ранній стадії пожежі, які отримані експериментальним шляхом що дозволяє зв'язати час спрацювання спринклерної СВПП з пожежною навантагою об'єкту, який розглядається, та площею поширення пожежі.

У зв'язку з вище наведеним, залишається актуальною проблема підвищення ефективності спринклерних зрошувачів автоматичних систем пожежогасіння, які є складовою обладнання протипожежного захисту об'єктів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [8] досліджено вплив орієнтації спринклера, по відношенню до струменя гарячого газу, на час його спрацювання. Було виявлено, що зміна кута орієнтації зрошувача з перпендикулярної до потоку (90°) на 60° , 30° і паралельно потоку (0°) призвело до збільшення часу спрацювання спринклера приблизно на 8%, 84% і 163% відповідно. Також з'ясовано, що площа пожежі, наприклад штабелю дерев'яних піддонів, може збільшитися в 2,5 рази при зміні орієнтації з перпендикулярної на паралельну. Але дослідження часу спрацювання спринклерного зрошувача виконано тільки з використанням методів моделювання обчислювальної гідродинаміки і не було продубльовано натурним експериментом.

У дослідженні [9] визначено час спрацювання скляної колби спринклерного зрошувача і відповідну швидкість тепловиділення різних скляних колб при моделюванні пожежі в житловому приміщенні. Результати експерименту демонструють, що площа пожежі значно зменшується при спрацюванні спринклера з низьким RTI та низькою робочою температурою в порівнянні зі спринклерами, які зазвичай використовуються в громадських приміщеннях. Нажаль, дослідження виконані тільки для пожежної навантаги, яка характерна для громадських приміщень і результати дослідів не можуть бути поширені на об'єкти іншого призначення.

В [10] розглядаються питання, щодо можливості використання Fire Dynamics Simulator (FDS) для прогнозування часу спрацювання спринклера у порівнянні з даними серії з 22 експериментів. Проведені дослідження показують, що використання FDS може забезпечити середню достовірність прогнозу часу спрацювання спринклера. Але, якщо при моделюванні «простих» експериментів, коли враховуються, лише такі параметри моделі як швидкість тепловиділення, геометрія і характеристики спринклера, результати добре збігаються з експериментальними, то при розв'язанні складних задач потрібно враховувати рівень точності, бажаний у контексті цілого проекту, доступність обчислювальних ресурсів та накладених часових обмежень.

В [11] проведено комплексні експерименти по вивченню впливу пластини колектора тепла (HCP) на час спрацювання спринклера. Досліджувався зрошувач з термочутливою колбою з температурою спрацювання 68°C , який обладнаний HCP та без неї. Однак експериментальні дані показують, що HCP не

може скоротити час спрацьовування спринклерного зрошувача в стандартному випробуванні зануренням, а також, що випробування зануренням не підходить для вивчення термочутливості спринклерних зрошувачів з НСР.

В [12] продемонстрована можливість використання 3D моделювання при визначенні часу спрацьовування спринклерного зрошувача для досліджень, що спрямовані на підвищення ефективності проектування спринклерних систем, які забезпечують пожежну безпеку об'єктів. Однак, наявність джерел невизначеності, що пов'язані з визначенням швидкості потоку та температури, обмежують можливості по застосуванню цієї моделі.

У статті [13] розглянуті питання застосування інструментів Fire Dynamics Simulator та B-RISK для комп'ютерного моделювання випробувань спринклерних зрошувачів прихованого типу в житлових приміщеннях. В результаті досліджень отримана емпірична ступенева залежність, що пов'язує індекс часу відгуку RTI та C-фактор. Але еквівалентність співвідношення факторів RTI / C не підтверджена тестом в приміщенні для спринклерних зрошувачів закритого типу і потребує проведення натурних досліджень.

Таким чином, не вирішеною частиною проблеми є встановлення взаємозв'язку між часом спрацювання спринклерного зрошувача та поширюванням пожежі в приміщенні, що захищається.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є експериментальне визначення часу спрацьовування спринклерних зрошувачів з урахуванням властивостей горючих речовин та матеріалів, які перебувають у приміщенні, що захищається, а також отримання емпіричної залежності часу спрацьовування спринклерного зрошувача від швидкості зростання температури в приміщенні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести теоретичні обґрунтування для планування експерименту та формулювання початкових вимог для його проведення з урахуванням впливу на динаміку зміни температури в приміщенні таких параметрів як питома теплота згоряння, лінійна швидкість поширення полум'я, масова швидкість вигорання.

2. Отримати експериментальні дані про час спрацьовування спринклерного зрошувача в умовах максимально наближених до умов реальної експлуатації на запропонованій установці, де можна моделювати різні сценарії розвитку пожежі.

3. Виконати аналіз результатів експериментального дослідження та отримати емпіричну залежність часу спрацьовування спринклерного зрошувача від кутового коефіцієнту зростання температури в приміщенні, що захищається.

4. Дослідження теоретичних умов для проведення експерименту

При виникненні пожежі в приміщенні, що захищається, згідно [14] виділяють сім фаз розвитку пожежі. Кожна із систем протипожежного захисту ефективна на ранній стадії пожежі, тому необхідно, щоб спрацьовування спринклерного зрошувача відбувалося не пізніше настання II фази (Stage Two – Growth), тобто час не повинен перевищувати 10–12 хвилин з моменту виникнення пожежі.

Для успішної ліквідації осередку пожежі з використанням спринклерних СВПГ необхідно виконання умови:

$$F_p > F_{\text{пож}} \quad (1)$$

де F_p – площа для розрахунку витрати води зі спринклерних зрошувачів, що спрацювали; $F_{\text{пож}}$ – площа пожежі на момент спрацювання спринклерних зрошувачів.

Площа F_p є фіксованою величиною і залежить від класу приміщення по пожежній небезпеці згідно [15].

Площа $F_{\text{пож}}$ є змінною величиною і в приміщенні, що захищається, у загальному випадку має кругову форму. Причому $F_{\text{пож}} = f(v_{\text{л}})$, де $v_{\text{л}}$ – лінійна швидкість поширення полум'я. Вона залежить від виду й природи горючих речовин і матеріалів, від здатності до запалення й початкової температури, від інтенсивності газообміну на пожежі й спрямованості конвективних газових потоків, від ступеня дисперсності горючих матеріалів, їхнього просторового розташування й інших факторів.

Згідно довідковим даним [14] проведені натурні випробування дозволили встановити інтервали зміни лінійних швидкостей $v_{\text{л}}$ поширення полум'я при пожежі для різних об'єктів і матеріалів. В табл. 1 наведені 2 об'єкти з різними ступенями вогнестійкості (СВ).

Площа F_p для розглянутих об'єктів узята з додатка А [15], а r_p – радіус обчислений з умови спрацювання спринклерних зрошувачів над областю пожежі. При цьому час спрацювання (руйнування) теплових замків на розрахунковій площі повинен бути менше часу розвитку пожежі.

Як було доведено в [16], середнє об'ємна швидкість зростання температури на початковій стадії розвитку пожежі – лінійна. Кількісною величиною, що описує цей процес, є кутовий коефіцієнт цієї лінійної функції, що визначається з формули:

$$k = \frac{T_{\text{сп}}}{\tau_{T_{\text{сп}}}} \quad (2)$$

де $T_{\text{сп}}$ – температура спрацювання, °С; $\tau_{T_{\text{сп}}}$ – час досягнення температури спрацювання.

Табл. 1. Визначення мінімального й максимального часу спрацювання спринклерних зрошувачів залежно від швидкості поширення пожежі

| №п/п | Найменування об'єкта або матеріалу | F_p , м ² | r_p , м | min $v_{\text{л}}$, м/хв | max $v_{\text{л}}$, м/хв | min t, хв | max t, хв |
|------|---|---------------------------|--------------|------------------------------|------------------------------|--------------|--------------|
| 1 | Освітні й лікувальні установи: I, II СВ | 72 | 4,79 | 0,6 | 1 | 4,79 | 8 |
| | III, IV СВ | 72 | 4,79 | 2 | 3 | 1,6 | 2,4 |
| 2 | Деревообробні підприємства: лісопильні цехи (будинки I, II, III СВ) | 216 | 8,29 | 1 | 3 | 2,75 | 8,29 |
| | те ж, будинки IV і V СВ | 216 | 8,29 | 2 | 5 | 1,66 | 4,15 |

Для приблизної оцінки динаміки росту температури в конвективній колонці була проведена серія чисельних експериментів на підставі зонної математичної

моделі [17], що з достатнім ступенем точності дозволяє оцінити швидкість зміни температури в зоні під стелею, де розміщуються зрошувачі спринклерної СВПТ. Результати розрахунків представлені на рис. 1.

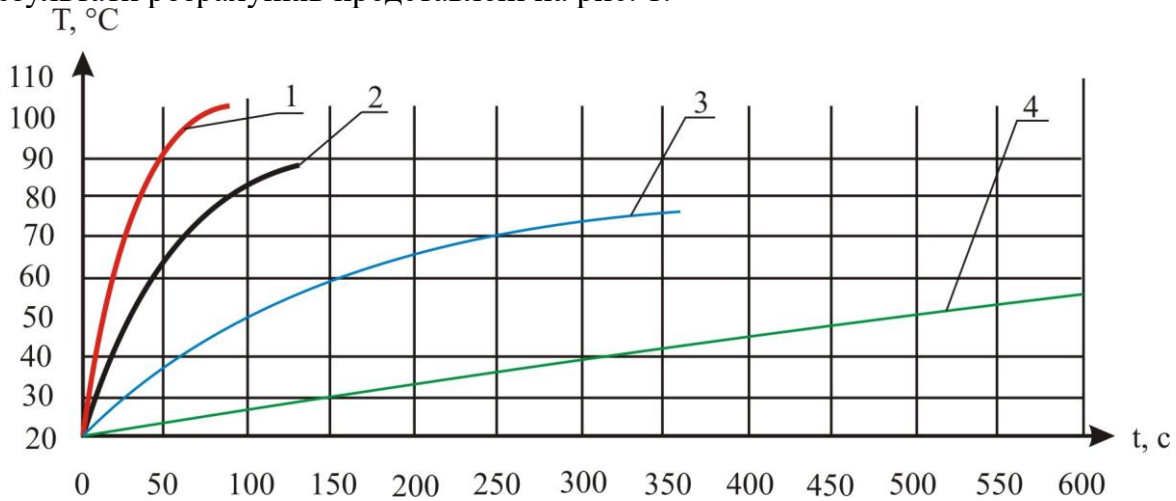


Рис. 1. Залежність зміни температури в зоні під стелею приміщення в межах конвективної колонки для різних видів горючого навантаження: 1 – склад льоноволокна; 2 – приміщення облицьоване панелями; 3 – громадська будівля; 4 – телефонний кабель

Криві характеризують швидкість зростання температури за інших рівних умов (не беручи до уваги горіння легкозаймистих та горючих рідин, для яких швидкість поширення полум'я значно вище, ніж для твердих горючих матеріалів) у приміщенні висотою 3,5 м.

5. Експериментальне дослідження часу спрацьовування спринклерного зрошувача

Інтенсивність зростання температури моделювалась за допомогою регулювання напруги, що подається на нагрівальний елемент 1 за допомогою цифрового блоку задавання температури 13 з панеллю індикації 14 (рис. 2).

Установка розроблялася на підставі наступних теоретичних передумов:

- оскільки динаміка температури в місці установки зрошувача, що залежить від цілого ряду факторів, не є метою експериментального дослідження, то вона може бути попередньо визначена за допомогою математичної моделі, що досить вірогідно описує зазначений процес;

- комбінація різних вихідних даних (питома теплота згоряння, лінійна швидкість поширення пожежі, масова швидкість вигорання, висота приміщення, у якому відбулася пожежа й т.п.) може привести до одержання подібної динаміки температури в місці установки зрошувача, тому прив'язка експерименту до конкретного пожежного навантаження або розмірів приміщення не виконувалась;

- істотну роль у процесі теплообміну грають теплофізичні властивості середовища, що оточує колбу, у зв'язку із чим було виключене використання нагрітої рідини для обігріву колби, замість них застосований блок ламп накаливання різної потужності, тому що потік нагрітого повітря, що утвориться при цьому, більшою мірою відповідає складу середовища в приміщенні на початковій стадії пожежі (за винятком часток диму);

- спрацьовування зрошувача обумовлене механічним руйнуванням стінки колби, тому з метою наближення умов проведення експерименту до реальних,

колба в процесі нагрівання повинна бути піддана впливу статичного надлишкового тиску (близько 0,2 МПа), достатнього для спрацьовування вузла керування спринклерної СВПП;

- створення мінімального необхідного тиску дозволить одержати максимальне значення інерційності, завдання по вивченню залежності інерційності від величини надлишкового тиску не ставилися;

- оскільки нормативна відстань між зрошувачами відносно невелика, то в початковий період виникнення й розвитку пожежі передбачається, що спринклер буде перебувати в області конвективної колонки осередку пожежі;

- орієнтація зрошувача, а відповідно й колби, щодо напрямку конвективного потоку була обрана аналогічно найпоширенішому способу установки в приміщенні, що захищається, а саме, розеткою долілиць, що припускає урахування її дії, що екранує;

- для найбільш повного моделювання процесу теплообміну була передбачена заливка води в патрубок, до якого приєднаний зрошувач;

- випробуванню піддавалися спринклерні зрошувачі серійного виробництва, широко використовувані при монтажі СВПП.

Основним завданням є створення стійкої (без істотних коливань) динаміки температури. Для чого була виготовлена випробувальна камера, що виключає вплив сторонніх повітряних потоків на зрошувач.

Основним елементом установки є випробувальна камера 2, що має прозору передню стінку для візуального огляду стану зрошувача. У нижній частині камери передбачене місце для установки нагрівального елемента. У кришці камери жорстко закріплений патрубок 5 довжиною 0,1 м, до якого за допомогою хрестовини приєднаний манометр 6, універсальний сигналізатор тиску 7 і пристрій для підключення повітряного компресора 8. До вимірювальних приладів і пристроїв установки відносяться: терморпара 3, розташована на рівні колби, підсилювач сигналу 10, аналого-цифровий перетворювач 11 і персональний комп'ютер 12 з необхідним програмним забезпеченням.

Пристрої 4, 5, 6, 7 і 8 утворюють герметичну систему, здатну витримувати надлишковий тиск не менш 0,1 МПа. Нагрівальний елемент 1 установлений у термоізовльованій камері 2 таким чином, щоб нагріте повітря по каналу надходило у верхню частину камери й нагрівало зрошувач.

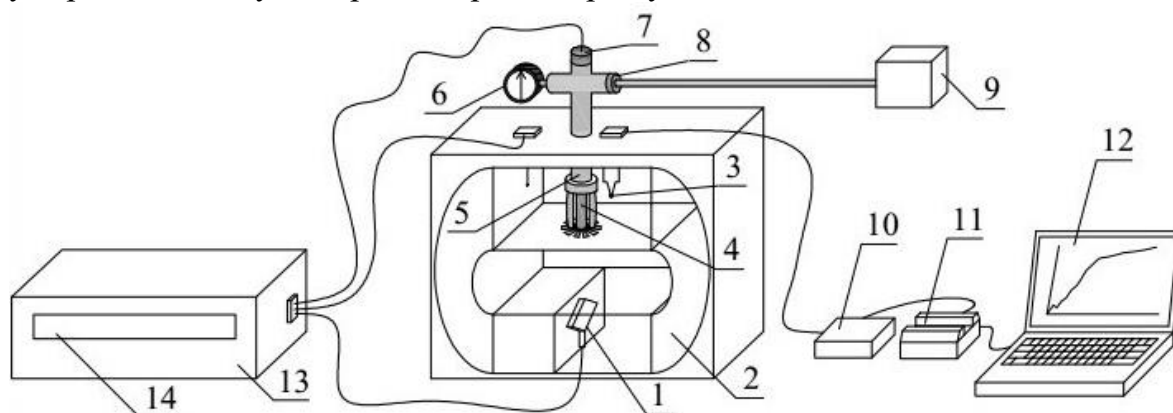


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – нагрівальний елемент; 2 – корпус із термоізовльованою камерою; 3 – терморпара; 4 – спринклерний зрошувач; 5 – патрубок для наповнення водою; 6 – манометр; 7 – заглушка; 8 – пристрій для підключення компресора; 9 – компресор; 10 – підсилювач сигналу; 11 – аналого-цифровий перетворювач; 12 – персональний комп'ютер; 13 – цифровий блок завдання температури; 14 – панель керування

Спринклерний зрошувач 4 приєднувався до патрубку 5. Через отвір, що закривається датчиком 7, у патрубок 5 заливалася вода до хрестовини, після чого отвір герметично закривався. До пристрою 8 підключався компресор, за допомогою якого створювався надлишковий тиск не менш 0,1 МПа над дзеркалом рідини, що перебуває в патрубку 5. Манометр 6 дозволяє візуально контролювати величину надлишкового тиску над зрошувачем у процесі проведення експерименту.

З моменту початку експерименту відлік часу проводиться автоматично й відображається на панелі індикації 14 блоку керування 13. Так само в ході проведення експерименту такі параметри, як поточний час і температура колби спринклерного зрошувача, фіксувалися за допомогою програмного забезпечення на ПЕОМ.

Після спрацювання зрошувача (розкриття колби) фіксувався час і автоматично припинялася подача живлення на нагрівальний елемент. Після закінчення експерименту верхня кришка камери знімалася, внутрішній простір камери провітрювалося для охолодження повітря в ній до первісної температури.

Випробуванню піддавалися спринклерні зрошувачі з температурою спрацювання 57 °С. Відповідно до методики проведення експерименту моделювалися різні температурні режими, для яких оцінювалася інерційність.

Для кожного з чотирьох температурних режимів було проведено по три експерименти. Після чого були визначені середні значення інерційності залежно від швидкості наростання температури. Експериментальні дані про середню інерційність представлені на рис. 3.

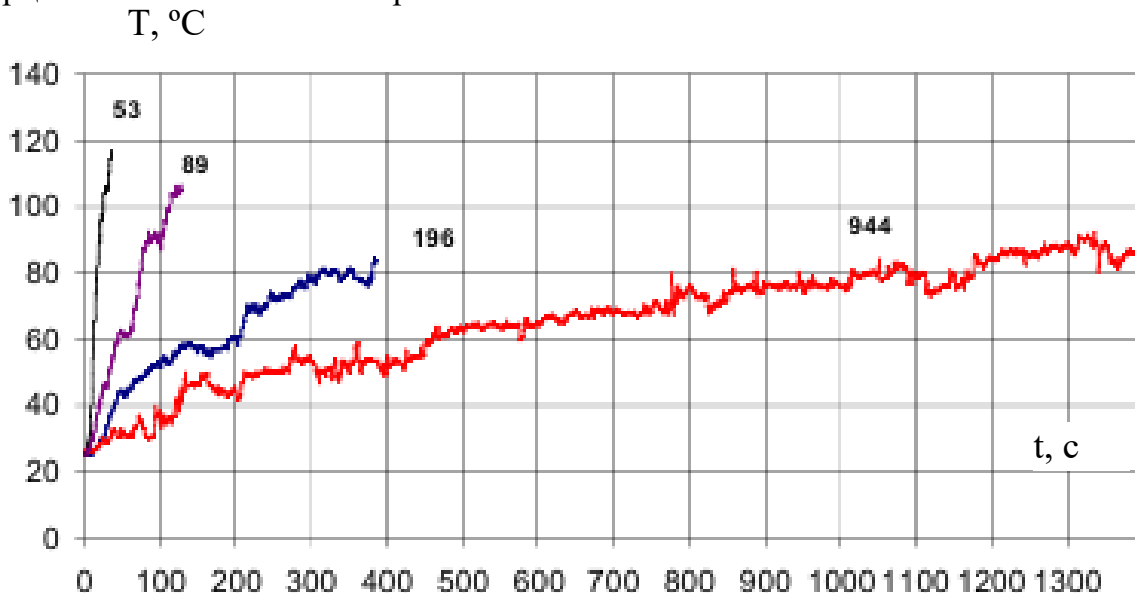


Рис. 3. Результати експерименту зі зрошувачем з температурою спрацювання 57 °С

6. Аналіз експериментальних даних та отримання емпіричної залежності часу спрацювання спринклера

На підставі даних, що отримані в ході експерименту і наведені на рис. 3, побудована залежність інерційності від кутового коефіцієнта k (рис.4).

Отриманий графік свідчить про наявність стійкого зв'язку між розглянутими параметрами, отже, можливо математичний опис побудованої залежності.

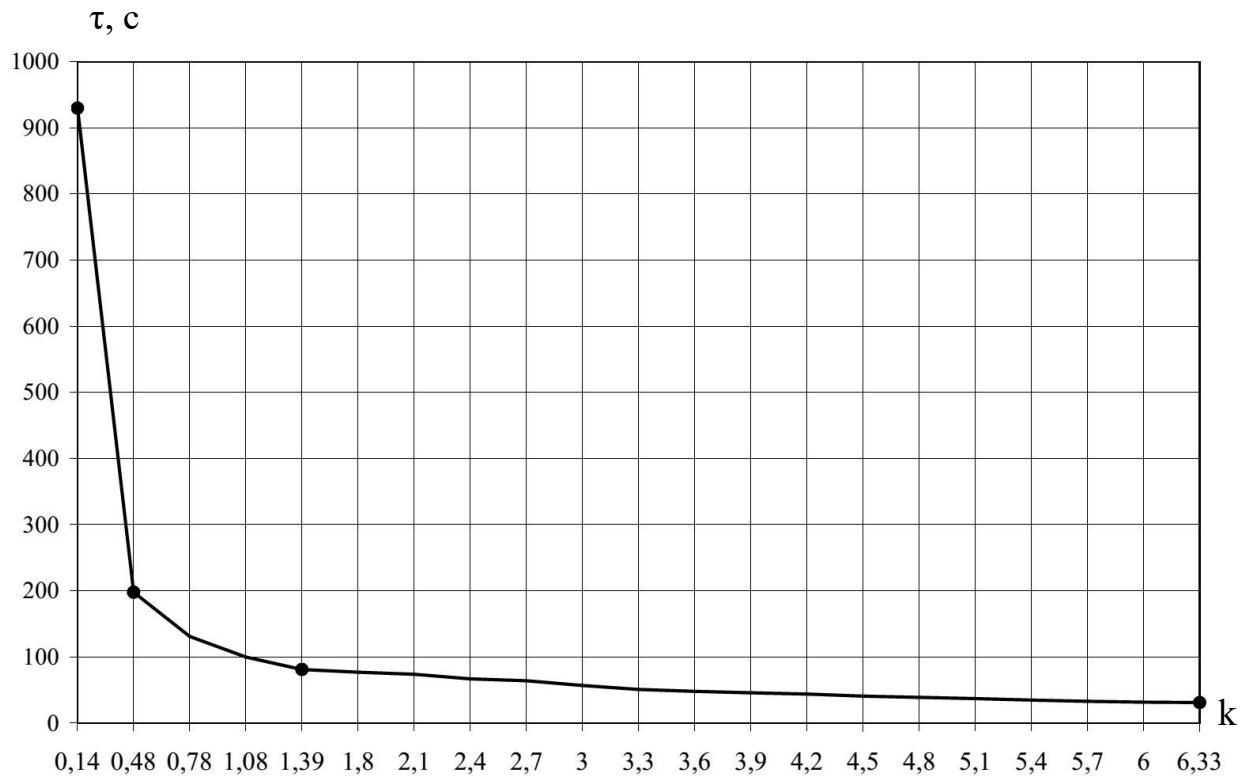


Рис. 4 Залежність зміни інерційності зрошувача від k

За допомогою програмного комплексу MS Excel була визначена аналітична залежність, що описує зображену на рис. 4 криву. У результаті одержали емпіричний вираз для оцінки інерційності спринклерного зрошувача з номінальною температурою спрацьовування $57\text{ }^\circ\text{C}$:

$$\tau_u = 1705 \cdot (50 \cdot k - 5,5)^{-0,74}. \quad (3)$$

Вираз (3) графічно представлено на рис. 5.

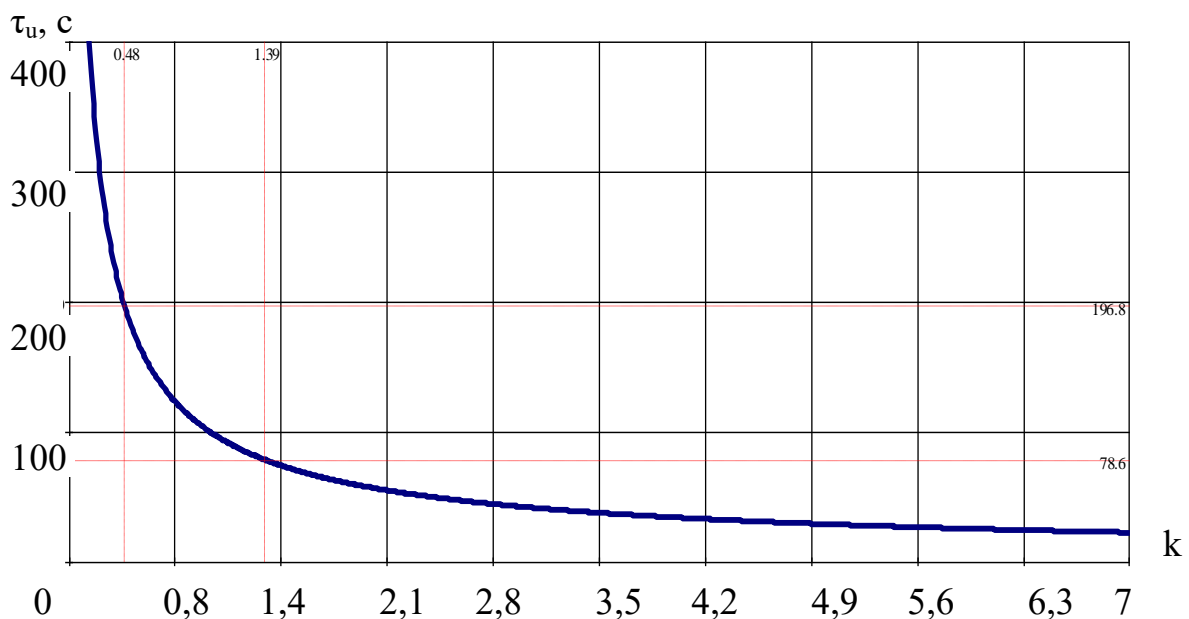


Рис. 5 Емпірична залежність інерційності зрошувача від k

З урахуванням (2) вираз (3) прийме вид:

$$\tau_u = 1705 \cdot \left(50 \cdot \frac{57}{\tau_{57}} - 5,5 \right)^{-0,74}. \quad (4)$$

Тоді час із моменту виникнення пожежі до спрацьовування першого спринклерного зрошувача, відповідно до початку подачі води в осередок пожежі можна визначити за допомогою формули:

$$\tau_{OB}^{57} = \tau_{Tp} + \left[1705 \cdot \left(50 \cdot \frac{57}{\tau_{57}} - 5,5 \right)^{-0,74} \right]. \quad (5)$$

Для випадків коли час досягнення температури спрацьовування спринклерного зрошувача лежить в межах від 50 с до 200 с, залежність (5) представлено в графічному вигляді на рис. 6.

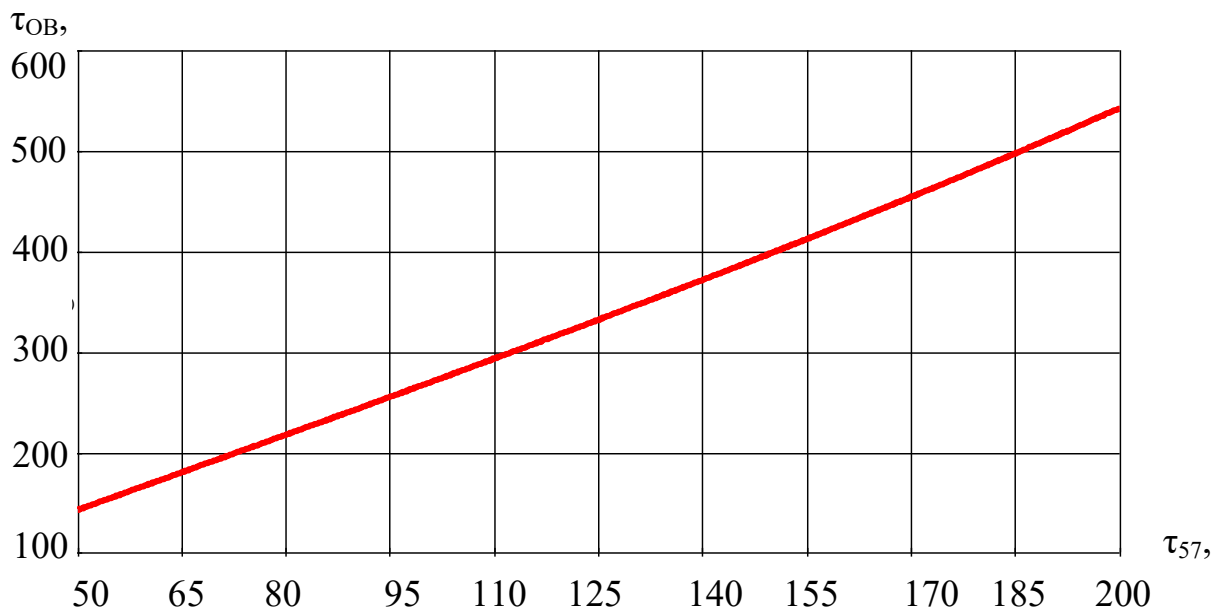


Рис. 6 Залежність часу спрацьовування зрошувача від часу досягнення температури 57 °C

Таким чином, в наведеному діапазоні зміни часу досягнення температури спрацьовування теплового замка спринклера вираз (5) може бути апроксимований лінійною залежністю.

7. Обговорення результатів експериментального визначення часу спрацювання спринклерних зрошувачів.

Показником ефективності спринклерної СВПП є своєчасне реагування на підвищення температури в приміщенні і подача вогнегасної речовини. Але різні за призначенням приміщення мають різну пожежну навантагу і пожежа в них буде розповсюджуватись з різною лінійною швидкістю. Як показує аналіз (табл. 1), нормативні документи не враховують такі особливості об'єкту, як наявність горючих матеріалів у складі будівельних конструкцій, що призводить

до зниження ступеня вогнестійкості будинку. На даний факт треба зважати при виборі типу спринклерного зрошувача для захисту об'єктів зі ступенем вогнестійкості нижче третього (СО III, IV, V), тому що час, за який повинно відбутися руйнування теплового замка спринклерного зрошувача, скорочується в 2-3 рази порівняно з часом спрацьовування зрошувача в будинку I та II ступеню вогнестійкості. Це вимагає застосовувати спринклери з малою інерційністю.

Дослідження змін температури під стелею приміщення для різних видів горючого навантаження (рис. 1), показало, що в зоні розміщення теплових замків спринклерних зрошувачів, на початковій стадії пожежі, зростання температури буде відбуватися за лінійним законом. Це дозволяє моделювати пожежу в різних видах будівель шляхом створення в місці встановлення спринклера надлишкової температури, що лінійно зростає зі швидкістю від $0,067 \text{ }^\circ\text{C/s}$ до $1,6^\circ\text{C/s}$. Тоді визначати інерційність спрацьовування теплового замка спринклерного зрошувача можна враховуючі вираз кутового коефіцієнта (2).

З врахуванням перелічених фактів розроблена методика проведення експерименту по визначенню інерційності спрацьовування спринклерного зрошувача.

Для реалізації експерименту запропонована установка для визначення інерційності спрацьовування спринклерних зрошувачів, яка дозволяє проводити їх випробування методом занурення. Використання цифрової обробки сигналу про значення температури навколо чутливого елемента дозволило отримати наступні технічні характеристики дослідної установки:

- точність завдання і вимірювання температури $0,1^\circ\text{C} \pm 0,065 \text{ }^\circ\text{C}$;
- точність вимірювання часу спрацьовування не менше 1 с;
- діапазон зміни початкової температури від 15 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ з дискретністю $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$;
- швидкість зростання температури від 0,1 до $30 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{хв}^{-1}$ з дискретністю $0,1^\circ\text{C}\cdot\text{хв}^{-1}$.

Це дозволило варіювати швидкістю зміни температури в випробувальній камері і моделювати вплив на чутливий елемент спринклерного зрошувача продуктів згоряння целюлозо містких, текстильних та синтетичних матеріалів. Недоліком запропонованої установки можна вважати відсутність можливості зміни орієнтації спринклера відносно напрямку теплового потоку.

Проведений аналіз показав, що використання виразу (3) для визначення інерційності спрацьовування спринклерного зрошувача дає похибку в порівнянні з результатами експерименту не більше 15% для значень k від 0,48 і вище (рис. 5). При менших значеннях k похибка складає близько 30 %. Для усунення вказаного недоліку необхідно для опису залежностей, представлених на рис. 3, використовувати поліном другого ступеню.

Аналіз залежності (5) свідчить про можливість адекватного визначення часу спрацьовування зрошувача, коли значення часу досягнення температури $57 \text{ }^\circ\text{C}$ належать діапазону від 50 с до 200 с, що відповідає сценарію швидкого розвитку пожежі. Разом з тим, існують обмеження, щодо застосування формули (5) при моделюванні пожежі, що розвивається повільно.

8. Висновки

1. Аналіз нормативних вимог показав, що величина розрахункової площі для спринклерної системи пожежогасіння враховує тільки призначення об'єкту (громадська будівля або виробниче приміщення), але не враховує такий показник, як ступінь вогнестійкості будинку. Розрахунок значень мінімального і

максимального часу спрацьовування спринклерного зрошувача, який залежить від лінійної швидкості розповсюдження пожежі, показав, що проміжок часу від початку пожежі до моменту подачі води для будинків з різною ступеню вогнестійкості зменшується вдвічі для виробничих будинків та втричі для громадських будинків. Але при цьому розрахункова площа лишається постійною: 72 м^2 – для громадських будинків та 216 м^2 – для виробничих. Це змушує приділяти більше уваги питанню вибору типу спринклерного зрошувача за такою характеристикою, як інерційність спрацьовування, при їх застосування в будинках з низьким ступенем вогнестійкості. Були сформульовані вимоги, виконання яких забезпечують успішну ліквідацію осередку пожежі. Запропоновано використовувати зонну математичну модель для оцінки градієнту зростання температури під стелею, що дозволить визначити час руйнування теплових замків спринклерних зрошувачів.

2. Розроблено експериментальну установку для визначення часу спрацьовування спринклерних зрошувачів, яка порівняно з аналогами здійснює автоматичний вимір часу та температури спрацьовування спринклерного зрошувача. За рахунок використання цифрового блоку задавання температури на мікроконтролері сімейства ATmega8, в установці реалізована можливість програмування різних алгоритмів швидкості зміни температури у випробувальній камері, це дає можливість моделювати різні сценарії розвитку початкової стадії пожежі. Проведено серію експериментів по визначенню часу спрацьовування спринклерного зрошувача з температурою спрацьовування $57 \text{ }^\circ\text{C}$. В результаті проведеного експерименту отримано чотири значення часу спрацьовування 53 с, 89 с, 196 с і 944 с, що відповідає різним швидкостям зростання температури, які відтворювались в ході експерименту і моделювали процес горіння целюлозо містких та синтетичних матеріалів з різною пожежною навантагою. Були отримані відповідні значення коефіцієнта $k = \{6,33; 1,39; 0,48; 0,14\}$. Аналіз залежності інерційності теплового замка спринклерного зрошувача від кутового коефіцієнта k підтверджує гіпотезу про те, що інерційність спрацьовування спринклерного зрошувача і швидкість зміни температури середовища навколо під час пожежі має загалом нелінійний характер.

3. Обробка експериментальних даних чисельними методами аналізу дозволила отримати аналітичний вираз, що пов'язує час спрацьовування теплового замка спринклерного зрошувача з температурою його спрацьовування та інтенсивністю зміни температури оточуючого повітря. Отриманий вираз для визначення часу з моменту виникнення пожежі до спрацьовування першого спринклерного зрошувача дозволяє оцінити інерційність теплового замка спринклерного зрошувача з номінальною температурою спрацьовування $57 \text{ }^\circ\text{C}$ з урахуванням геометричних розмірів і виду пожежного навантаження конкретного приміщення, а також дозволяє обґрунтувати ефективність застосування спринклерних систем водяного пожежогасіння.

Література

1. John R., Hall Jr. U.S. Experience with Sprinklers and Other Automatic Fire Extinguishing Equipment. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2013. 77 с. URL: https://nfsa.org/wp-content/uploads/2019/07/US_experience_with_sprinklers_2009.pdf (дата звернення: 05.04.2021).

2. Ahrens M. U.S. experience with sprinklers. National Fire Protection Association, Fire Analysis and Research Division. 2017. 35 с. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/files/news-and-research/fire-statistics-and-reports/suppression/ossprinklers.pdf> (дата звернення: 05.04.2021).

3. John R., Hall Jr., Ahrens M., Evarts D. Fire Protection Research Foundation report: Sprinkler Impact on Fire Injury. 2012. 26 с. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/Fire-Sprinkler-Initiative/Benefits-of-Home-Fire-Sprinklers/Sprinkler-Performance-and-Benefits/Impact-of-fire-sprinklers-on-firefighter-injuries.ashx> (дата звернення: 05.04.2021).

4. ISO 6182-1:2014(en) Fire protection – Automatic sprinkler systems – Part 1: Requirements and test methods for sprinklers. 68 с. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6182:-1:ed-3:v1:en> (дата звернення: 05.04.2021).

5. LPS 1039 Requirements and testing methods for automatic sprinklers. Issue 5.2. 41 с. URL: <https://www.redbooklive.com/download/pdf/LPS1039.pdf> (дата звернення: 05.04.2021).

6. Liu H., Chun Yin Yuen A., Cordeiro I., Han Y., Bo Yuan Chen T., Chan Q. N., Kook S., Yeoh G. H. A novel stochastic approach to study water droplet/flame interaction of water mist systems // Numerical Heat Transfer. 2021. Part A: Applications. V. 79(8). P. 570–593. doi: 10.1080/10407782.2021.1872272

7. Kagou G., Kola B., Mouangue R. CFD studies of the propagation and extinction of flame in an under-ventilated and over-ventilated enclosure // Journal of Taibah University for Science. 2016. V. 10(3). P. 393–402. doi: 10.1016/j.jtusci.2015.04.010

8. Nasif M. S., Fekry M., Ismail F. B. CFD investigation on the effect of varying fire sprinkler orientation on sprinkler activation time // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. V. 11 (22). P. 12919–12922. URL: http://www.arnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_1116_5323.pdf (дата звернення: 05.04.2021).

9. Arvidson M. The Response Time of Different Sprinkler Glass Bulbs in a Residential Room Fire Scenario // Fire Technology. 2018. V. 54(5). P. 1265–1282. doi: 10.1007/s10694-018-0729-8

10. Hopkin C., Spearpoint M., Bittern A. Using experimental sprinkler actuation times to assess the performance of Fire Dynamics Simulator // Journal of Fire Sciences. 2018. V. 36(4). P. 342–361. doi:10.1177/0734904118772306

11. Lin S. L., Chow W. K., Woo Y. K., Szeto D. F., Su C. H. Effect of heat collector plate on thermal sensitivity of sprinkler heads in large terminal Halls // Journal of Building Engineering. 2019. V. 25. 100787. doi: 10.1016/j.jobe.2019.100787

12. Węgrzyński W., Krajewski G., Tofiło P., Król A., Król M. 3D mapping of the sprinkler activation time // Energies. 2020. 13. 1450. doi:10.3390/en13061450

13. Hopkin C., Spearpoint M. Numerical simulations of concealed residential sprinkler head activation time in a standard thermal response room test // Journal of Fire Sciences. 2021. V. 42(1). P. 98–111. doi: 10.1177/0143624420953302

14. Vondou F. M., Abbe C. V. N., Zaida J. T., Mvogo P. O., Mouangue R. Experimental Study of the Effect of Confining on the Development of Fire in a Closed Compartment // Journal of Combustion. V. 2021. 6662830. doi:10.1155/2021/6662830

15. BS EN 12845 Fixed Fire Fighting Systems – Automatic Sprinkler Systems – Design, Installation and Maintenance. 222 с. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14212825/bs-en-12845> (дата звернення: 05.04.2021).

16. Antonov I., Velichkova R., Antonov S., Grozdanov K. Mathematical Modeling and Simulation of Development of the Fires in Confined Spaces. 2020. doi: 10.5772/intechopen.91274

17. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю. А. Кошмаров, С. В. Пузач, В. В. Андреев и др. Москва. 2012. 126 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/244202> (дата звернення: 05.04.2021).

S. Bondarenko, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Murin, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

I. Yakovlev, Master's student

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE INERTIA OF ACTIVATION OF SPRINKLERS OF AUTOMATIC WATER EXTINGUISHING SYSTEMS

Experimental data on the inertia of sprinklers with a response temperature of 57 °C were obtained, taking into account the rate of temperature rise, and an empirical dependence of the response time of a sprinkler from the moment of fire occurrence was obtained. This makes it possible to evaluate the use of this type of sprinklers for the protection of various premises, depending on the class of fire hazard. When choosing the initial data for the design of automatic sprinkler systems for water fire extinguishing, depending on the class of premises for fire hazard, two approaches are visible. For rooms of class OH, with an increase in fire hazard, the intensity of the extinguishing agent supply remains constant ($I_0 = 5$ mm/min), and the extinguishing area for calculating the water consumption increases ($F_p = 72$ m² for OH1, $F_p = 144$ m² for OH2, $F_p = 216$ m² for OH3, $F_p = 360$ m² for OH4). For HHP premises, a different approach is taken. When designing a sprinkler automatic water fire extinguishing system, the calculated area for determining the total water consumption remains constant ($F_p = 260$ m²) and the intensity of the extinguishing agent supply changes ($I_0 = 7.5$ mm/min for HHP1, $I_0 = 10$ mm/min for HHP2, $I_0 = 12.5$ mm/min for HHP3). However, both the first approach and the second imply that the area of fire extinguishing remains a fixed value, and the linear rate of fire development is not explicitly taken into account anywhere. Therefore, obtaining data on the response time of the sprinkler, depending on the rate of rise of the fire temperature in the protected room, will determine the minimum irrigation area of the fire center. The optimal choice of the calculated area for the water consumption when extinguishing a fire will optimize the parameters of the hydraulic distribution network, the choice of system elements, and calculate the effectiveness of the fire extinguishing system.

Keywords: automatic water fire extinguishing system, sprinkler, response time index, linear speed of fire development, calculated area for water consumption

References

1. John, R., Hall, Jr. (2013). U.S. Experience with Sprinklers and Other Automatic Fire Extinguishing Equipment. National Fire Protection Association, Quincy, MA. Retrieve from https://nfsa.org/wp-content/uploads/2019/07/US_experience_with_sprinklers_2009.pdf

2. Ahrens, M. (2017). U.S. experience with sprinklers. Fire Analysis and Research Division, National Fire Protection Association. Retrieve from <https://www.nfpa.org/-/media/files/news-and-research/fire-statistics-and-reports/suppression/ossprinklers.pdf>

3. John, R., Hall, Jr., Ahrens, M., Evarts, D. (2012). Fire Protection Research Foundation report: Sprinkler Impact on Fire Injury. Retrieve from <https://www.nfpa.org/-/media/Files/Fire-Sprinkler-Initiative/Benefits-of-Home-Fire-Sprinklers/Sprinkler-Performance-and-Benefits/Impact-of-fire-sprinklers-on-firefighter-injuries.ashx>

4. ISO 6182-1:2014(en) Fire protection – Automatic sprinkler systems – Part 1: Requirements and test methods for sprinklers. Retrieve from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6182:-1:ed-3:v1:en>

5. LPS 1039 Requirements and testing methods for automatic sprinklers. Issue 5.2. Retrieve from <https://www.redbooklive.com/download/pdf/LPS1039.pdf>
6. Liu, H., Yuen, A. C. Y., Cordeiro, I., Han, Y., Chen, B. Y. T., Chan, Q. N., Kook, S., Yeoh, G. H. (2021). A novel stochastic approach to study water droplet/flame interaction of water mist systems. *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*, 79(8), 570–593. doi: 10.1080/10407782.2021.1872272
7. Kagou, G., Kola, B., Mouangue, R. (2016). CFD studies of the propagation and extinction of flame in an under-ventilated and over-ventilated enclosure. *Journal of Taibah University for Science*, 10(3), 393–402. doi: 10.1016/j.jtusci.2015.04.010
8. Nasif, M. S., Fekry, M., Ismail, F. B. (2016). CFD investigation on the effect of varying fire sprinkler orientation on sprinkler activation time. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(22), 12919–12922. Retrieve from http://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_1116_5323.pdf
9. Arvidson, M. (2018). The Response Time of Different Sprinkler Glass Bulbs in a Residential Room Fire Scenario. *Fire Technology*, 54(5), 1265–1282. doi: 10.1007/s10694-018-0729-8
10. Hopkin, C., Spearpoint, M., Bittern, A. Using experimental sprinkler actuation times to assess the performance of Fire Dynamics Simulator. *Journal of Fire Sciences*, 36 (4), 342–361. doi:10.1177/0734904118772306
11. Lin, S.L., Chow, W.K., Woo, Y.K., Szeto, D.F., Su, C. H. (2019). Effect of heat collector plate on thermal sensitivity of sprinkler heads in large terminal Halls. *Journal of Building Engineering*, 25, 100787. doi: 10.1016/j.jobbe.2019.100787
12. Węgrzyński, W., Krajewski, G., Tofiło P., Król, A., Król, M. (2020). 3D mapping of the sprinkler activation time. *Energies*, 13(6), 1450. doi: 10.3390/en13061450
13. Hopkin, C., Spearpoint, M. (2021). Numerical simulations of concealed residential sprinkler head activation time in a standard thermal response room test. *Journal of Fire Sciences*, 42(1), 98–111. doi: 10.1177/0143624420953302
14. Vondou, F. M., Abbe, C. V. N., Zaida, J. T., Mvogo, P. O., Mouangue, R. (2021). Experimental Study of the Effect of Confining on the Development of Fire in a Closed Compartment. *Journal of Combustion*, 2021, 6662830. doi:10.1155/2021/6662830
15. BS EN 12845 (2015). Fixed Fire Fighting Systems – Automatic Sprinkler Systems – Design, Installation and Maintenance Retrieve from <https://standards.globalspec.com/std/14212825/bs-en-12845>
16. Antonov, I., Velichkova, R., Antonov, S., Grozdanov, K. (2020). Mathematical Modeling and Simulation of Development of the Fires in Confined Spaces. doi: 10.5772/intechopen.91274
17. Koshmarov, Yu., Puzach, S., Andreev, V. et all. (2012). Forecasting of dangerous factors of fire indoors. Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations, Moscow, Russia. Retrieve from <https://www.twirpx.com/file/244202>

Надійшла до редколегії: 05.03.2021

Прийнята до друку: 07.04.2021