

УДК 536.3: 535.34:614.838.441

А.Г. Виноградов, к.ф.-м.н., доц., Г.О. Малигін,
Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

ЕКРАНУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДЯНИХ ЗАВІС: МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ І ПОРІВНЯННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТОМ

Представлено математичну модель взаємодії теплового випромінювання від осередку пожежі з розпиленою водою, а також розроблену на її основі методику розрахунків екрануючих властивостей водяних завіс протипожежного призначення. Верифікація розрахункової методики виконана на основі порівняння чисельних розрахунків з результатами відповідних експериментальних вимірювань

Ключові слова: водяна завіса, теплове екранування, методика розрахунків.

Постановка проблеми. На даний час розрахунок дренчерних завіс при їх проектуванні виконується відповідно до діючих в Україні нормативних документів [1-9] за методиками, призначеними для розрахунку систем пожежогасіння із застосуванням розпиленої води [10-12]. При розрахунку враховуються їх геометричні розміри, загальна й питома витрата води, інтенсивність зрошування. Виходячи з цього, обирається тип зрошувачів, розраховуються їх кількість, просторове положення, параметри трубопроводу й тиск подачі води. Однак у методиках розрахунку відсутні параметри, які фактично визначають захисні властивості водяної завіси: коефіцієнт екранування теплового випромінювання, діаметри крапель, концентрація крапель. У технічних паспортах дренчерних зрошувачів, у переліку їх технічних характеристик ці параметри також відсутні. Фактично, при розрахунку не враховується різниця між системою пожежогасіння розпиленою водою й системою для захисту навколишнього простору від негативних чинників пожежі, хоча завдання цих систем істотно відрізняються.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Наукові дослідження в напрямку створення методів розрахунку екрануючих властивостей водяних завіс в Україні та країнах СНД не проводяться, судячи з відсутності відповідних публікацій. Аналіз публікацій далекого зарубіжжя свідчить про те, що інтенсивність даного напрямку досліджень у світі в останні 20-25 років досить висока [13-15]. Однак проблема створення надійних розрахункових методів і на їх основі стандартних методик розрахунку екрануючих властивостей водяних завіс на даний час не вирішена [16, 17]. Протягом останніх 2 років з метою теоретичного аналізу процесів, пов'язаних з екрануванням теплових потоків розпиленою водою, розроблена математична модель, елементи якої опубліковані в роботах [18-21].

Постановка задачі та її розв'язання. Узагальнити й систематизувати основні результати, отримані при розробці математичної моделі екранування променистого теплового потоку від осередку пожежі за допомогою водяної завіси [18-21]. Представити розрахункові формули й обґрунтувати методику розрахунків коефіцієнта пропускання водяної завіси для типових умов застосування водяних завіс протипожежного призначення. Виконати чисельні розрахунки для типових режимів взаємодії водяних завіс із тепловим випромінюванням пожеж та порівняти їх із опублікованими результатами експериментальних досліджень.

Методика розрахунків. Схема процесу теплового екранування представлена на рис. 1. Первинне випромінювання з інтенсивністю I_1 від осередку пожежі падає на дренчерну водяну завісу товщиною l . Частина променистого теплового потоку W_{abs} поглинається краплями (внаслідок чого їх температура підвищується) і далі проходить ослаблене випромінювання інтенсивністю I_2 .

Коефіцієнт пропускання водяної завіси:

$$H = \frac{I_2}{I_1}. \quad (1)$$

Для визначення величини H необхідно розглянути процеси взаємодії краплі води з тепловим випромінюванням. Як показують розрахунки, при показнику заломлення води $n_m = 1,33$ усередину сферичної краплі проходить 93,4% падаючого на краплю потоку W_1 , утворюючи внутрішньо-краплинний енергетичний потік W_{in} (рис. 2):

$$W_{in} = 0,934 \cdot W_1.$$

Інші 6,6% (потік W_{refl}) відбиваються від поверхні краплі з невеликою зміною напрямку із шириною індикатриси розсіяння $\pm 14^\circ$ по рівню 0,5.

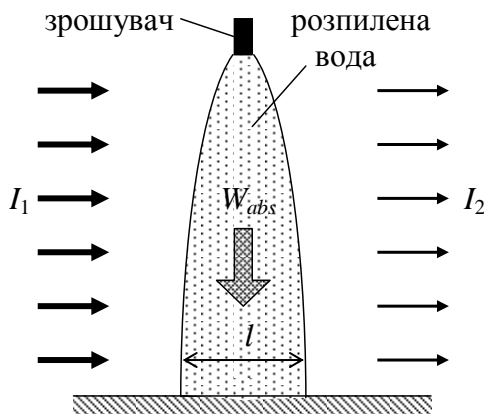


Рисунок 1 - Схема процесу теплового екранування.

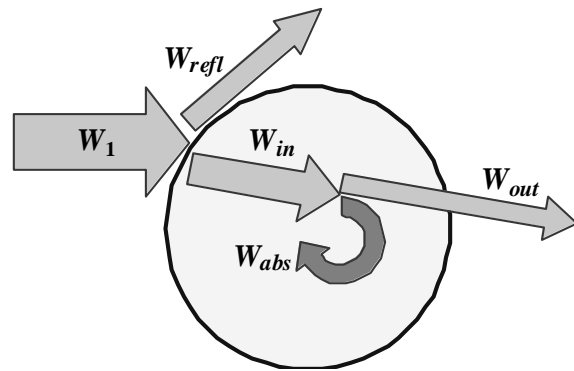


Рисунок 2 - Схема взаємодії теплового випромінювання з краплею води.

Внутрішньо-краплинний потік W_{in} частково поглинається водою (на нагрівання води йде потік W_{abs}), і назовні із краплі виходить його частина W_{out} . Коефіцієнт пропускання краплі залежить від її діаметра D і ефективної температури осередку пожежі T :

$$\eta(D, T) = \frac{W_{out}}{W_{in}}. \quad (2)$$

У загальному випадку розрахунок коефіцієнта пропускання краплі досить складний і вимагає комп'ютерної обробки великих масивів даних.

Для монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі λ у роботі [19] виконаний розрахунок у наближенні геометричної оптики:

$$\eta_\lambda = e^{-0,84\alpha_\lambda \cdot D}, \quad (3)$$

де α_λ – коефіцієнт поглинання води при довжині хвилі λ :

$$\alpha_\lambda = 4\pi k / \lambda,$$

де k – уявна частина комплексного показника заломлення води. Результат розрахунку α_λ у графічному вигляді представлений на рис. 3.

Розрахункова формула для коефіцієнта пропускання теплового випромінювання монодисперсної водяної завіси [18, 19]:

$$H = \exp\left\{-0,934 \cdot [1 - \eta(D, T)] \cdot \frac{3 \cdot w_{vv}}{2 \cdot D} \cdot l\right\}, \quad (4)$$

де w_{vv} – об'ємна частка води в завісі.

Реальне теплове випромінювання від осередку пожежі не є монохроматичним, тому формула (3) не підходить для розрахунку коефіцієнта пропускання краплі.

Згідно з літературними даними [22], форму спектра випромінювання пожежі можна визначити як суму двох основних компонент: 1) спектр випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ); 2) молекулярні смуги газоподібних продуктів горіння:

$$I_{\lambda} = (1 - \psi) \cdot I_{b, \lambda} + \psi \cdot I_{m, \lambda}, \quad (5)$$

де ψ – ваговий коефіцієнт, що визначає співвідношення внесків $I_{b, \lambda}$ (спектр АЧТ) і $I_{m, \lambda}$ (молекулярні смуги). Найбільш сильний вплив на форму спектрів випромінювання пожеж чинять, зазвичай, дві молекулярні смуги, розташовані при довжинах хвиль 4,4 мкм (CO_2) і 2,7 мкм ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$).

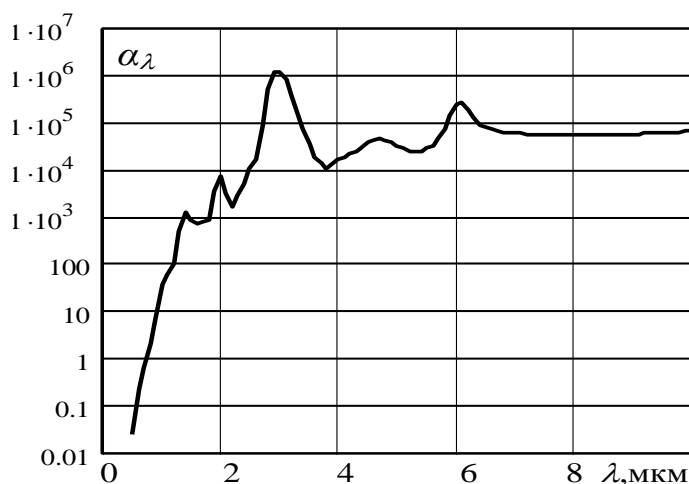


Рисунок 3 - Залежність коефіцієнта поглинання води від довжині хвилі випромінювання

Спектральна інтенсивність випромінювання АЧТ дається формулою Планка:

$$I_{b, \lambda} = \frac{I_{b0}}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc_0}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right)}, \quad (6)$$

де T – температура тіла, К; h – стала Планка, Дж·з; c_0 – швидкість світла у вакуумі, м/с; k_B – стала Больцмана, Дж/с; I_{b0} – нормувальний коефіцієнт.

Для розрахунків внеску $I_{m, \lambda}$ пропонується використовувати дві названі вище смуги у вигляді лінійної комбінації лоренціанів зі співвідношенням інтенсивностей 25:1:

$$I_{m, \lambda} = I_{m0} \left(\frac{(\Delta\lambda_1)^2}{(\lambda - \lambda_{01})^2 + (\Delta\lambda_1)^2} + \frac{0,04 \cdot (\Delta\lambda_2)^2}{(\lambda - \lambda_{02})^2 + (\Delta\lambda_2)^2} \right), \quad (7)$$

де $\lambda_{01} = 4,4$ мкм і $\lambda_{02} = 2,7$ мкм – положення центрів смуг; $\Delta\lambda_{01} = 0,14$ мкм і $\Delta\lambda_{02} = 0,22$ мкм – напівширина на напіввисоті кожної зі смуг; I_{m0} – нормувальний коефіцієнт.

Розрахунок коефіцієнта пропускання краплі виконується чисельним інтегруванням:

$$\eta = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda} \cdot e^{-0,84 \cdot \alpha_{\lambda} \cdot D} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda}. \quad (8)$$

Для наближених розрахунків можна використовувати знайдену в роботі [21] функцію апроксимації:

$$\eta(\psi, D, T) = (1 - \psi) \cdot \eta(0, D, T) + \psi \cdot \eta(1, D, T). \quad (9)$$

У даному співвідношенні $\eta(0, D, T)$ – коефіцієнт пропускання краплі для випромінювання АЧТ. У роботі [19] для нього отримана функція апроксимації:

$$\eta(0, D, T) = AD^B + C, \quad (10)$$

де коефіцієнти A, B, C – деякі функції від температури T :

$$A = 1,25 \cdot 10^{-35} \cdot (T - 207,6)^{11,02}, \quad (11)$$

$$B = -2,329 + 1,6362 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,0519 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 1,386 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 5 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 0,651 \cdot 10^{-16} \cdot T^5, \quad (12)$$

$$C = -9,59 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,002495T}. \quad (13)$$

Функція апроксимації залежності коефіцієнта пропускання краплі від її діаметра для молекулярних смуг:

$$\eta(1, D, T) = 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot D^{-1,45} - 2 \cdot 10^{-3}. \quad (14)$$

Всі представлені вище формули отримані в наближенні монодисперсної водяної завіси, тобто вони справедливі для випадку, який на практиці не реалізується.

Для врахування розподілу за розмірами крапель водяної завіси в роботі [20] використана функція логарифмічно нормального розподілу:

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot D} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \cdot \left(\ln \frac{D}{\mu} \right)^2 \right], \quad (15)$$

де μ – медіана (параметр масштабу), σ – параметр форми, що визначає ширину функції розподілу.

Середній діаметр крапель розподілу (15) визначається співвідношенням:

$$D_{av} = \mu \cdot e^{\frac{\sigma^2}{2}}. \quad (16)$$

Для розрахунку коефіцієнта пропускання водяної завіси весь діапазон значень діаметрів крапель представлений у вигляді ряду дискретних величин із кроком ΔD : $D_i = i \cdot \Delta D$, де індекс i приймає цілочисельні значення. У роботі [20] отримана розрахункова формула:

$$H = \prod_{i=1}^{i_{\max}} \exp \left[-0,559 \cdot (1 - \eta(\psi, D_i, T)) \cdot \frac{w_{vv} \cdot l \cdot \Delta D \cdot D_i}{\sigma \cdot D_{av}^3} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \cdot \left(\ln \frac{D_i}{D_{av}} + \frac{\sigma^2}{2} \right)^2 - 3 \cdot \sigma^2} \right]. \quad (17)$$

Формула (17) істотно складніше формули (4), застосовуваної для розрахунку величини H монодисперсних завіс. Для спрощення розрахунків пропонується формальна заміна полідисперсної завіси на еквівалентну їй по екрануючих властивостях монодисперсну (при тій же відносній кількості води w_{vv}).

В [20] знайдена розрахункова формула для діаметра крапель еквівалентної монодисперсної завіси:

$$D_{eq} = D_{av} \cdot e^{2,33 \cdot \sigma^{2,33}}. \quad (18)$$

Використовуючи еквівалентну монодисперсну завісу, для розрахунку коефіцієнта пропускання можна замість складної розрахункової формули (17) використовувати формулу, аналогічну (4):

$$H = \exp \left\{ -1,4 \cdot \left[1 - \eta(\psi, D_{eq}, T) \right] \cdot \frac{w_{vv} \cdot l}{D_{eq}} \right\}. \quad (19)$$

У підсумку, можна запропонувати наступний алгоритм розрахунку коефіцієнта пропускання завіси:

1. Задати вихідні параметри, набір яких залежить від конкретного завдання: D_{av} , σ , T , ψ , w_{vv} , l . Параметри T і ψ визначаються видом і режимом пожежі. Параметр l можна знайти на основі паспортних технічних характеристик зрошувача. Для визначення параметрів w_{vv} , D_{av} і σ необхідно виконати відповідні виміри.
2. По формулі (18) знайти діаметр крапель еквівалентної монодисперсної завіси D_{eq} .
3. По формулах (9)-(14) виконати розрахунок коефіцієнта пропускання краплі $\eta(\psi, D_{eq}, T)$.
4. По формулі (19) визначити коефіцієнт пропускання водяної завіси H .

Примітка: Найбільш трудомістким у даному алгоритмі є п. 1. Надалі доцільно включити параметри D_{av} , σ , w_{vv} , l у перелік обов'язкових паспортних технічних характеристик зрошувачів для водяних завіс. Крім того, для оперативного визначення наближених параметрів T і ψ виконати класифікацію основних типів пожеж і на основі літературних даних і додаткових досліджень визначити для кожного з них типові значення даних параметрів.

Порівняння теоретичних розрахунків з експериментом. Для верифікації математичної моделі порівняємо виконані за її допомогою теоретичні розрахунки з даними експериментальних вимірювань.

Слід зазначити, що вимірювання параметрів, які входять до складу формул (9) – (14), (18), (19) є доволі складною проблемою. Особливо проблематичним є вимірювання величин D і w_{vv} . Тому з усіх опублікованих експериментальних робіт даного напрямку досліджень лише робота [23] певною мірою відповідає поставленій задачі (має необхідний набір вимірюваних параметрів).

В табл. 1 представлені експериментальні дані з роботи [23] для конічних розпилювачів води трьох типів, позначених №1, №2 і №3. Застосовані наступні позначення величин: p – тиск води у розпилювачі; $G = (1 - H)$ – ослаблення теплового потоку завісою; Q – витрати води; v – швидкість крапель.

Таблиця 1 – Параметри розпилених струменів конічних розпилювачів води

Розпилювач	p , бар	G	Q , мл/хв.	D , мкм	v , м/с
№ 1	1	0,028	350	268	1,2
	2	0,052	550	175	0,9
	3	0,069	625	110	1,7
	4	0,092	700	104	1,5
	5	0,106	750	102	2,0
	6	0,124	875	102	1,8
	7	0,111	950	93	2,3
	8	0,139	1000	126	1,8
№ 2	1	0,036	1400	392	1,9
	2	0,063	1825	266	2,2
	3	0,077	2000	167	2,9
	4	0,095	2250	162	3,5
	5	0,115	2500	115	4,6
	6	0,122	2750	126	5,0
	7	0,136	3000	156	5,5
	8	0,149	3250	148	3,6
№ 3	1	0,061	2600	691	1,0
	2	0,110	3750	753	1,3
	3	0,160	4500	794	1,6
	4	0,205	5000	638	2,4
	5	0,247	5750	550	2,9
	6	0,273	6000	182	3,7
	7	0,354	6750	178	4,2
	8	0,355	7500	160	4,8

За наведеними в роботі [23] даними щодо експериментального обладнання для обчислень були задані наступні параметри: $T = 1173$ К; $l = 0,8$ м. Величини w_{vv} для кожної точки графіка обчислювались за формулою:

$$w_{vv} = \frac{4Q}{\pi l^2 v},$$

де враховано, що розпилений струмінь має форму конуса з діаметром перерізу l .

На рис. 4 представлені графіки залежностей $G(Q)$ для кожного розпилювача. Суцільна лінія – результат розрахунку за формулою (2), пунктир – експеримент (за даними, наведеними в таблиці). Аналіз графіків свідчить про наступне:

- 1) більшість теоретичних і експериментальних значень ослаблення G є достатньо близькими, за виключенням кількох значень для розпилювача № 3.
- 2) значні коливання і немонотонність теоретичних залежностей $G(Q)$ не можна пояснити фізичними причинами. Вони свідчать про вплив великих експериментальних похибок при вимірюванні величин D і v .

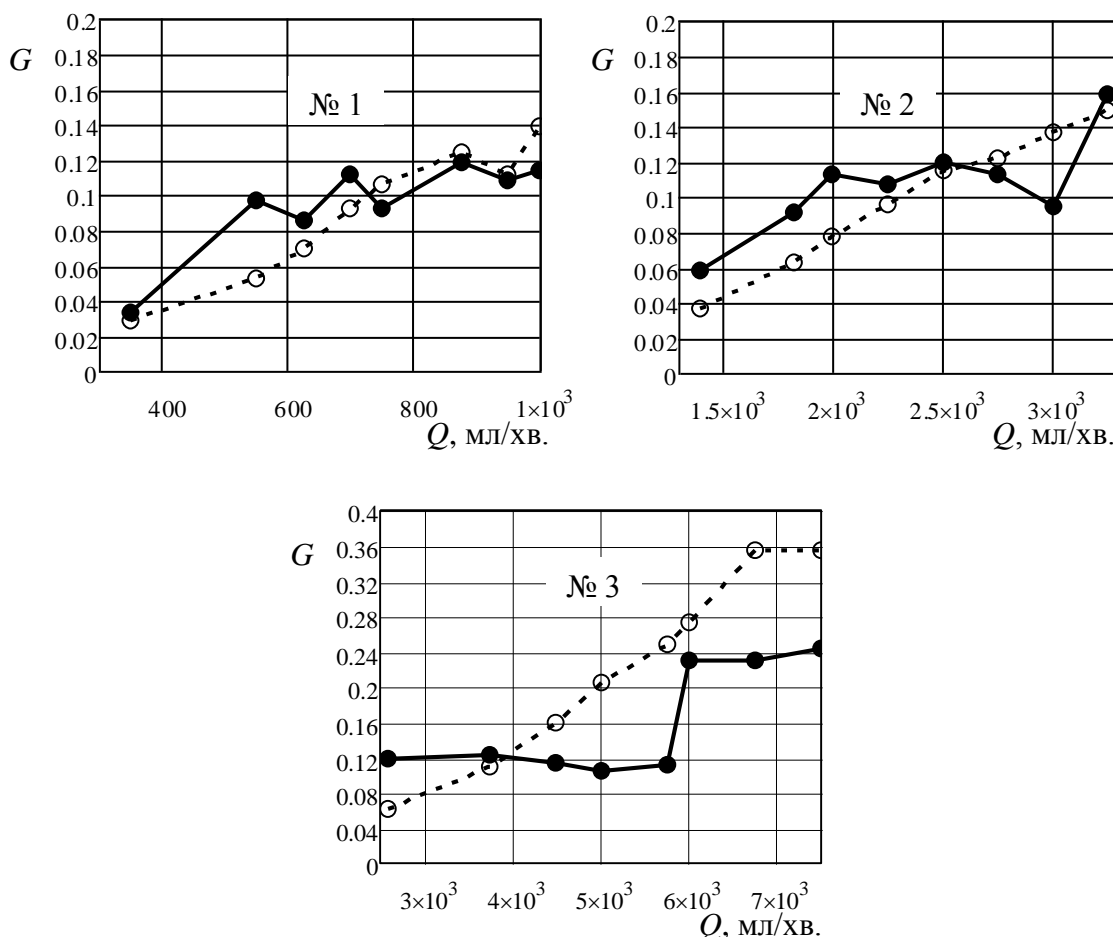


Рисунок 4 - Теоретичні (лінія) і експериментальні (пунктир) залежності ослаблення теплового випромінювання від витрат води водяної завіси.

На основі великої кількості теоретичних і експериментальних робіт відомо, що при зростанні тиску води в розпилювачі середній діаметр крапель монотонно зменшується, а їх середня швидкість – монотонно зростає. Але при детальному аналізі даних, наведених у таблиці, можна побачити, що для всіх трьох розпилювачів ці залежності є немонотонними. Найбільш показовим прикладом є раптове зменшення діаметру крапель в 3 рази при зміні тиску води в розпилювачі № 3 від 5 бар до 6 бар. Це явище не можна пояснити фізично, і саме воно є причиною найбільш різкого зростання на теоретичному графіку № 3.

Отже, достатня близькість більшості теоретичних і експериментальних значень ослаблення теплового потоку свідчить про дієздатність представлені математичної моделі. В той же час, для її більш детальної верифікації необхідно отримати результати якісних експериментальних вимірювань.

Висновки. Представлена математична модель і створена на її основі розрахункова методика дозволяють виконувати розрахунки для визначення раціональних режимів водяних завіс, призначених для захисту від теплового випромінювання осередку пожежі. Виконані за допомогою даної методики розрахунки та їх порівняння з результатами опублікованих експериментальних досліджень засвідчили їх достатню близькість та подібну динаміку.

Перспективи подальших досліджень. Для більш ефективного застосування запропонованої вище розрахункової методики необхідно виконати експериментальні дослідження існуючих зрошувачів для водяних завіс з метою визначення параметрів, що застосовуються для розрахунків: об'ємну частку води в завісі w_{vv} , середній діаметр крапель D_{av} , параметр форми функції розподілу σ . Крім того, необхідно виконати експериментальні вимірювання коефіцієнту пропускання та інших параметрів водяної завіси, більш якісні, ніж

в роботі [23], з метою їх використання для верифікації математичної моделі та методики розрахунків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Протипожежна техніка. Установки водяного пожежогасіння автоматичні. Зрошувачі для водяних завес. Загальні технічні вимоги та методи випробовування : ДСТУ 5027:2008. – [Чинний від 2010-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 28 с. – (Національний стандарт України).
2. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва : ДБН В.1.1.7–2002*. – [Чинний від 2003-05-01]. – К. : Держбуд України, 2003. – 41 с. – (Державні будівельні норми України).
3. Системи протипожежного захисту. Інженерне обладнання будинків і споруд : ДБН В.2.5-56-2010. – [Чинний від 2011-10-01]. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 137 с. – (Державні будівельні норми України).
4. Протипожежний захист складів легкозаймистих та горючих рідин на підприємствах паливно-енергетичного комплексу. Інструкція з проектування, будівництва та експлуатації : НАПБ 05.033–2002. - [Чинний від 2002-04-01]. – К.: Міністерство палива та енергетики України, 2002. – 63 с. – (Державні будівельні норми України).
5. Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичення парів не вище 93,3 кПа : ВБН В.2.2-58.1–94. – [Чинний від 1994-04-01]. – К.: Держкомнафтогаз України, 1994. – 149 с. – (Відомчі будівельні норми України).
6. Будинки і споруди. Культурно-видовищні та дозвіллеві заклади : ДБН В.2.2-16–2005. – [Чинний від 2006-04-01]. – К.: Держбуд України, 2005. – 63 с. – (Державні будівельні норми України).
7. Причальные комплексы для перегрузки нефти и нефтепродуктов. Противопожарная защита. Нормы проектирования: ВСН 12–87. – [Введен в действие 1987-06-01]. – Минморфлота СССР. – 17 с. – (Ведомственные строительные нормы).
8. Будинки і споруди. Підприємства торгівлі. Основи проектування : ДБН В.2.2-23:2009. - [Чинний від 2009-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 50 с. - (Державні будівельні норми України).
9. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою : НАПБ Б 03.002–2007. [Чинний від 2007-12-03]. – К. : УкрІНДІПБ МНС Україна, 2007. – 27 с. (Державні будівельні норми України).
10. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / [Мешман Л.М., Цариченко С.Г., Былинкин В.А.]; под ред. Н.П. Копылова. – М.: ВНИИПО МЧС РФ, 2002. – 413 с.
11. Оросители водяных и пенных автоматических установок пожаротушения: учебно-методическое пособие. / [Л.М. Мешман, С.Г. Цариченко, В.А. Былинкин и др.]; под общ. ред. Н.П. Копылова. ВНИИПО МЧС РФ. – М., 2002. – 315 с.
12. Использование оросителей общего назначения для создания водяных завес. / Л.М. Мешман, С.Г. Цариченко, В.В. Алешин [и др.] // Пожарная безопасность. – 2001. – № 3. – С. 90-96.
13. Buchlin J.-M. Thermal shielding by water spray curtain / Buchlin J.-M. // J. Loss Prev. Process Industries, 2005. – Vol. 18, No. 4-6. – P. 423–432.
14. Hostikka S. Numerical modeling of radiative heat transfer in water sprays / S. Hostikka, K. McGrattan // Fire Safety Journal, 2006. – Vol. 41. – P. 76–86.
15. Collin A. Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield / A. Collin, S. Lechene, P. Boulet, G. Parent // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2010. – Vol. 57. – P. 537-553.
16. Sacadura J.-F. Radiative heat transfer in fire safety science / Sacadura J.-F. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 2005. Vol. 93, no. 1-3, P. 5–24.
17. Santangelo P.E. Fire control and suppression by water-mist systems / Santangelo P.E., Tartarini P. // Open Thermodyn. J., 2010. vol. 4, P.167-184.