



О. В. Шаповалов, С. Я. Вовк, Н. О. Ференц

І. А. Оношко, Ю. В. Кіндрацький

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-2006> – О. В. Шаповалов

<https://orcid.org/0000-0001-5278-3754> – С. Я. Вовк

<https://orcid.org/0000-0003-3139-0921> – Н. О. Ференц

<https://orcid.org/0000-0001-5793-1680> – І. А. Оношко

– Ю. В. Кіндрацький



o1972@ukr.net

АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЛОГІСТИЧНИХ СКЛАДІВ

Проблема. Для удосконалення пожежної безпеки на складах логістичної інфраструктури можна використовувати різні підходи та методи, зокрема встановлення систем автоматичної пожежної сигналізації, автоматичних систем пожежогасіння, навчання персоналу об'єкта, розробку планів евакуації, забезпечення належного технічного обслуговування електротехнічного обладнання і систем протипожежного захисту складів, проведення навчань оперативно-рятувальних підрозділів на конкретних об'єктах, а також розробку нових вогнегасних речовин для використання в процесі гасіння, застосування відеоаналітики для швидкого і безпомилкового виявлення пожежі, що може якісно вплинути на протипожежний захист вказаних об'єктів.

Мета. Здійснення аналізу досягнень у сфері протипожежного захисту складів логістичної інфраструктури з метою знаходження оптимального, економічно доцільного складу організаційно-технічного забезпечення логістичних складів і зменшення ризиків виникнення пожеж.

Методи дослідження. Для дослідження пожежної безпеки можуть використовуватися такі методи, як аналіз ризиків, моделювання пожеж та випробування систем протипожежного захисту і їх удосконалення. Удосконалення пожежної безпеки на вказаних об'єктах є одним з напрямків вирішення задачі забезпечення безпеки персоналу, збереження майна та зменшення ризику виникнення пожежі і наслідків від її виникнення, який реалізується шляхом швидкого виявлення пожежі, оповіщення про її виникнення та її ліквідації.

Основні результати дослідження. Здійснений аналіз дасть можливість в майбутньому отримати повне розуміння аспектів пожежної безпеки на логістичних складах, виявити прогалини і слабкі місця у застосованих методах і засобах захисту складів від пожеж та розробити ефективні заходи для удосконалення протипожежного захисту на складах логістичної інфраструктури.

Висновки. Ризики, пов'язані з виникненням пожеж на логістичних складах, демонструють потребу в дослідженні і розробці більш ефективних систем протипожежного захисту на основі новітніх технологій: системи виявлення загорання з використанням аспіраційних пожежних сповіщувачів, вмонтованих в стелажі інтелектуальних точкових пожежних сповіщувачів; систем пінного та водяного пожежогасіння з особливим розташуванням зрошувачів, яке передбачає їх розміщення в центрі простору, утвореного матеріалами зберігання.

Ключові слова: протипожежний захист, логістичний склад, виявлення пожежі, ефективна ліквідація, удосконалення.

O. V. Shapovalov, S. Y. Vovk, N. O. Ferents

I. A. Onoshko, Y. V. Kindratskiy

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ANALYSIS AND WAYS OF IMPROVING FIRE PROTECTION SYSTEMS OF LOGISTICS WAREHOUSES

Introduction. Various approaches and methods can be used to improve fire safety at logistics infrastructure warehouses, including installing automatic fire alarm systems, and automatic fire extinguishing systems, training facility personnel, developing evacuation plans, ensuring proper maintenance of electrical equipment and warehouse fire protection systems, conducting training operative and rescue units at specific objects, as well as the development of new fire-extinguishing

substances for use in the extinguishing process, the use of video analytics for quick and error-free fire detection can have a qualitative effect on the fire protection of the specified objects.

Purpose. Analysis of achievements in the field of fire protection of logistics infrastructure warehouses to find the optimal, economically feasible composition of organisational and technical support of logistics warehouses and reduce the risk of fires.

Methods. Methods such as risk analysis, fire modelling, sting and improvement of fire protection systems can be used for fire safety research. Improving fire safety at the specified facilities is one of the directions for solving the problem of ensuring the safety of personnel, preserving property, and reducing the risk of fire and its consequences, which is implemented through quick fire detection, notification of its occurrence, and its elimination.

Results. The analysis carried out will make it possible in the future to gain a full understanding of aspects of fire safety in logistics warehouses, to identify gaps and weaknesses in the applied methods and means of fire protection of warehouses, and to develop effective measures to improve fire protection in logistics infrastructure warehouses.

Conclusions. The risks associated with the occurrence of fires in logistics warehouses demonstrate the need for research and development of more effective fire protection systems based on the latest technologies: fire detection systems using aspiration fire detectors mounted in racks of intelligent point fire detectors; foam and water fire extinguishing systems with a special arrangement of sprinklers, which involves placing them in the centre of the space formed by the storage materials.

Keywords: fire protection, logistics warehouse, fire detection, effective elimination, improvement.

Постановка проблеми.

Збільшення товарообігу під час економічного розвитку країни та забезпечення логістики в умовах війни в Україні змушує суб'єктів господарювання організувати місця, у яких можна було б швидко і без зайвих труднощів перевантажувати, зберігати та перенаправляти товари. Такими місцями є логістичні склади. Зважаючи на очевидну перевагу використання логістичних складів, їх стає все більше, вони розбудовуються, збільшуються за об'ємом зберігання та стають більш технологічними.

Пожежна небезпека на складах логістичної інфраструктури зумовлена рядом чинників: зберіганням великої кількості горючих і легкозаймистих матеріалів, таких як горючі рідини, газу, батареї та інші вибухонебезпечні матеріали; відсутністю або невідповідністю автоматичних систем протипожежного захисту; різними видами вентиляції та димовидалення; наявністю різних допоміжних систем з комунікаціями, які проходять через усю споруду; невідповідністю організації зберігання товарів, яка може призвести до утворення перешкод для гасіння та зниження ефективності автоматичних систем протипожежного захисту; порушенням правил зберігання пожежонебезпечних матеріалів; відсутністю або недостатньою кількістю засобів індивідуального захисту працівників від чинників пожежі; помилками в організації технологічного процесу, такими як недотримання правил експлуатації обладнання або несправність техніки, що може призвести до виникнення пожежі. Сукупність цих чинників може значно збільшувати ризик виникнення пожежі на логістичних складах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В сучасному суспільстві та в умовах війни в Україні зростає попит на різноманітну продукцію, збільшується важливість логістичної мережі, кількість складів також зростає, оскільки обсяг логістики збільшується, особливо у великих регіональних містах і мегаполісах.

У приміщеннях логістичних складів, в яких зберігаються товари широкої номенклатури, як стверджують автори [1], міститься величезний перелік устаткування, яке призначене для їх зберігання. В роботі автори пропонують спосіб інтелектуального контролю розповсюдження пожежі на складах. Склади можуть відрізнитися залежно від виду матеріалів, що зберігаються. Ступінь автоматизації на складі залежить від обсягів матеріалу та можливостей власників. Висота штабелювання товарів, як стверджують автори [1], є визначальним чинником з точки зору пожежної безпеки, для прогнозування об'ємно-планувальних рішень будівлі та місць і способів зберігання майна. Чинниками, які необхідно враховувати для реалізації протипожежного захисту при проектуванні складів, є площа будівлі, висота, методи зберігання, вид товару, а також чинні правила та норми.

З метою врахування впливів вказаних чинників автори [1] пропонують удосконалення протипожежного захисту приміщень складів шляхом керування соплом водяної завіси на основі програмованого логічного контролера (ПЛК), що дасть можливість уникнути швидкого поширення пожежі по площі складського приміщення.

Автори [2] запропонували план систематичного вдосконалення для посилення протипожежної здатності побутових стелажних складських будівель. Вони проаналізували пожежі у складі з конструктивними елементами з сендвіч-панелей та у складі з вогнестійкими будівельними конструкціями. Під час проведення аналізу автори [2] з'ясували, що важливим чинником у ліквідації пожеж в складських приміщеннях є їх забезпечення мобільним обладнанням для початкового гасіння пожежі, можливість доступу до споруди складу не менше ніж з трьох сторін, влаштування входів у споруду з інтервалом менше 40 м, розміщення обладнання для пожежогасіння в доступному місці на відкритому повітрі.

В результаті проведеного аналізу автори [2] дійшли висновку, що з метою надійного протипожежного захисту споруд складів та ефективної ліквідації пожеж необхідно удосконалювати стандартні операційні процедури (SOP) для кожного конкретного об'єкта з врахуванням об'ємно-планувальних рішень, можливих ризиків та можливого розвитку пожежі.

Проблеми, пов'язані з безпекою складу, описано та оцінено у роботі [3]. Автори розглядають склад як динамічний об'єкт, що працює в турбулентному середовищі. Навіть найкраще складені плани, стверджують автори, не гарантують кінцевого результату через виникнення в різних вимірах незапланованих, непередбачених ситуацій, що є наслідком навмисних і випадкових небезпек, спричинених людьми або несприятливими погодними умовами. Автори розробили методологію ідентифікації небезпек складської системи. Вони пропонують за рівнем вразливості до виникнення небезпечної ситуації раціоналізувати вибір заходів із забезпечення функціонування системи у небезпечному середовищі. Безпека будь-якого складу, стверджують автори [3], залежить від трьох груп факторів: технічних, юридичних і людських. Вони являють собою систему діяльності, яка потребує постійного вдосконалення, оскільки інноваційні рішення, нові вимоги та безпрецедентні небезпеки не перестають з'являтися.

Розподіл заходів безпеки на основі ризиків для запобігання та зменшення наслідків пожеж на складах проведено у статті [4]. Вогонь є основним небезпечним чинником для збереження майна та безпеки людей на підприємствах переробної промисловості, а також в інших галузях. Управління ризиками пожеж в складських будівлях і спорудах, в яких зберігаються матеріальні цінності, є складним процесом через потенційні причини виникнення пожеж. Як стверджують автори [4], загальна модель управління ризиками для пожеж у складських приміщеннях та спорудах відсутня. У їх роботі представлені відповідні заходи безпеки, досліджено розподіл та ефективність цих заходів безпеки для зменшення ризику пожежі на складах, розроблена методологія та запропонована загальна структура для конкретного дослідження. Ймовірність пожеж та наслідків від їх виникнення значно зменшується, що свідчить про ефективність запропонованого підходу. Загальну структуру, розроблену в дослідженні, можна пристосувати до різних випадків виникнення пожежі на складах з обмеженими маніпуляціями, а розподіл пожежної навантаги і впровадження відповідних заходів безпеки може значно знизити ризик виникнення пожежі на складі [4].

В роботі [5] на основі аналізу пожежі в логістичному складі автори визначили чотири

аспекти ризику пожежі в логістичних складах, а також розробили модель для оцінки пожежної небезпеки логістичних складів шляхом експертного дослідження з використанням методу МАІ (АНР) та нечіткої комплексної оцінки. Для встановлення єдиної факторної оцінки пожежного ризику в логістичному складі використовуються чотири фактори, якими є будівля складу, матеріали які зберігаються, управління, середовище. Значення 14 індексів, які використовуються для побудови матриці і пов'язані з вторинними показниками були знайдені на основі проведених експериментів. Розроблена авторами [5] модель використовувалась для оцінки та аналізу пожежної небезпеки логістичного складу. Результати показали, що методологія оцінки пожежної небезпеки логістичного складу є обґрунтованою та ефективною. Однак автори не врахували впливу зовнішніх чинників, зокрема, небезпечних природних процесів, терористичних загроз, військових дій.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз та шляхи вдосконалення систем протипожежного захисту на складах логістичної інфраструктури, дослідження сучасних технологій для запобігання, швидкого виявлення та гасіння пожежі.

Методи дослідження: для досягнення мети у роботі використані такі методи – методи теоретичного узагальнення і статистичний.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- проаналізувати способи раннього виявлення пожеж в логістичних складах;
- провести аналіз нормативних документів щодо забезпечення пожежної безпеки в логістичних складах;
- провести аналіз запропонованих рішень покращення систем виявлення та гасіння пожеж із застосуванням новітніх технологій в логістичних складах.

Результати роботи. Сучасний склад – це складна технічна споруда, яка складається з численних взаємопов'язаних елементів, має визначну структуру та виконує ряд функцій щодо перетворення матеріальних потоків, а також нагромадження, переробки і розподілу вантажів між споживачами [6].

На даний час у світа налічується більше двадцяти класифікацій складів [6]. Залежно від функцій і різноманітних характеристик, їх класифікують за такими ознаками як: галузь логістики, учасники в системі логістики, форма власності, види продукції, умови зберігання, ступінь механізації, технічні характеристики приміщень, транспортна інфраструктура, класи, функції тощо [6].

В Україні користуються міжнародною класи-

фікацією складських приміщень від брокерського агентства Knight Frank, яка базується на вимогах щодо технічних параметрів, території, обладнання й комунікацій. Згідно з нею склади поділяють на 6 класів: A+, A, B+, B, C, D [7]. Класифікація за класами від Knight Frank не бере до уваги транспортну інфраструктуру.

Згідно з ДБН В.2.2-43:2021 додаток А [7] складські будівлі класифікують за конструктивно-планувальними рішеннями, інженерними системами, площею забудови та позначають великими латинськими літерами А, В, С, D. Клас А – найвищий клас. Клас складської будівлі є одним із техніко-економічних показників проекту, який вказується у завданні на проектування.

Згідно з ДСТУ Б В.1.1-36 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою», складські будівлі та приміщення поділяють на категорії: А, Б, В, Д. Ступінь вогнестійкості складських будівель, залежно від категорії будівлі за вибухопожежною та пожежною небезпекою, кількості поверхів будівлі та площі поверху в межах протипожежного відсіку, приймається згідно з таблицею 1 ДБН В.2.2-43:2021 [7].

Таким чином, основна відмінність між складськими будівлями різних класів – об'ємно-планувальні рішення. Вплив об'ємно-планувальних рішень на пожежну безпеку складів розглядається у ряді робіт [1, 8, 32, 36]. Зокрема, автори [8] стверджують, що впродовж останніх років часто траплялися пожежі на складах із зовнішніми стінами виготовленими із сендвіч-панелей, а значна пожежна навантага ускладнювала заходи з пожежогасіння, і, як наслідок, спостерігалися значні матеріальні збитки. Аналізуючи причини виникнення пожеж в складах, автори [8] відзначили дві – недотримання правил пожежної безпеки та теплові прояви електричної енергії. З метою зменшення матеріальних збитків від імовірних пожеж в складах логістичної інфраструктури, необхідно оцінювати пожежну безпеку, розробляти технологію гасіння пожежі, вивчати архітектурні особливості для ефективної евакуації. Автори [8] за результатами досліджень вогнестійкості складу, запропонували архітектурні контрзаходи, такі як метод монтажу зовнішніх стін, протипожежне блокування, використання сертифікованої продукції, систему евакуації та обслуговування засобів пожежогасіння для запобігання поширенню вогню.

Дослідження альтернатив управління пожежною безпекою шляхом аналізу пожеж в складах представлено у роботі [9]. Зокрема, розглянуто причини пожежі та фактори, які сприяли її поширенню в логістичному складі в Ічхон, Кьонгі. Авторами [9] запропоновано заходи для запобігання

її повторенню. Причиною пожежі була іскра, яка виникла під час зварювальних робіт і призвела до спалаху пінополістиролу та пінополіуретану. Факторами, які сприяли поширенню пожежі, вважаються використання сендвіч-панелей з пінополістиролу та пінополіуретану і штучне відключення засобів пожежогасіння. Щоб запобігти таким надзвичайним ситуаціям, як згадувалась вище, необхідно заборонити використання сендвіч-панелей з пінополістиролу та пінополіуретану, які мають великі значення для швидкості поширення вогню, посилити моніторинг та покарання за виведення з ладу протипожежного обладнання, посилити систему управління безпекою та дотримання правил техніки безпеки.

Особливу увагу автори [3, 5, 8, 9, 10, 21, 22, 23, 40, 42,] надають пожежній безпеці складів із стелажним зберіганням товарів. Склад стелажного типу – склад, у якому стелажі встановлено в просторі з великою висотою підлоги, а предмети укладають на стелажі для їх тривимірного та ефективного зберігання. Автори [10] стверджують, що передумови та формування концентрованої спринклерної системи розроблені на основі трирічного дослідження пожеж в складах із стелажним зберіганням.

Розповсюдження полум'я під час пожежі при стелажному зберіганні відбувається дуже швидко по вертикалі. Тому, з метою швидкого реагування, автори [10] пропонують застосовувати вбудований в стійку автоматичний пожежний сповіщувач, який може виявити пожежу та повідомити про її місце на початковій стадії її розвитку і сформувати команду на відкриття електроклапана розподільних вертикальних труб. Після відкриття клапана вода витікає з концентрованого спринклера відкритого типу до димоходу та товарів, які зберігаються на полиці стелажа. Таким чином автори [10] пропонують провадити процес гасіння пожежі та зменшувати матеріальні збитки від них в складах із стелажним зберіганням.

Автори [11] розглядають пожежі на складах із стелажним зберіганням з вертикальним завантаженням товарів. Дослідження, які проводили дослідники [11] полягали в тому, щоб здійснити успішне гасіння пожежі. За результатами проведених експериментів автори зробили такі висновки: гасіння пожежі необхідно здійснювати спринклерними установками дренчерного типу із зонуванням областей на вертикальні ділянки; К-фактор спринклерних головок у стійці має бути 115 або більше, а кут розпилення води має бути 130 або менше; спринклерна головка повинна розпилювати воду протягом 4 хв 30 с з моменту виникнення пожежі; відстань по горизонталі між спринклерними головками в стійці має бути менше 2,4 м; відстань по вертикалі між спринклерними

головками в стійці повинна бути менше 2,5 м від висоти стійки; спринклерні головки в стійці повинні бути встановлені в центрі простору, утвореного матеріалами зберігання, через який виходять продукти горіння.

У роботі [12] представлені теоретичні та експериментальні дослідження пожеж у складах із стелажним зберіганням. Автори проводили випробування на вільне горіння багатошарових картонних коробок з гофрованого паперу. Випробування проводилися у зменшеному масштабі. В результаті проведених експериментів за допомогою осесиметричних квазістаціонарних кореляцій степеневому закону були розраховані висота поширення полум'я, надлишкова температура та швидкість руху газу біля стійки стелажа. Кореляції включають загальну швидкість конвективного виділення тепла, вертикальну ширину простору проходження продуктів горіння, висоту над підлогою та висоту віртуального походження. Отримані результати можна використовувати для прогнозування часу активації спринклерів у стійці, а також в інженерних моделях, які розроблені для прогнозування поширення полум'я та зростання пожежі у високостелажних сховищах. Окрім того дослідження показує, що запропонованим способом можна відтворити умови розвитку пожежі в різних масштабах, що має практичне значення.

Для забезпечення протипожежного захисту складу із стелажним зберіганням, стверджують автори [13], дуже важлива точна конструкція автоматичної спринклерної системи, тому що пожежна навантага подібних складів дуже висока і тому ліквідувати пожежу дуже важко. За допомогою програми PIPENET автори у роботі виконали гідравлічний розрахунок водопровідної мережі. Результати розрахунку проаналізували та порівняли з розрахунками, виконаними за стандартними методиками, для визначення оптимального методу проектування трубопроводної мережі для автоматичного стелажного складу. Методи проектування стосуються трасування трубопроводів на основі стандарту пожежної безпеки, проектування для ефективного будівництва та проектування з використанням верхнього граничного значення трубопроводу. Схеми розміщення трубопроводів, розмір яких визначається відповідно до кількості спринклерних головок, легко розробити, але є вірогідність, що витрата води збільшиться і створеного запасу води не вистачить. Схема розміщення трубопроводів для ефективного застосування автоматичної спринклерної системи, в яких обмежується розмір діаметра розгалужувального трубопроводу, дещо збільшують вартість будівництва, але при цьому

необхідна кількість води на гасіння зменшується. Така конструкція з використанням верхнього граничного значення трубопроводу, що обмежує максимальний розмір трубопроводу і робить його меншим за певне значення, може зменшити вартість будівництва, а також кількість необхідної води, таким чином покращуючи безпеку та надійність спринклерної системи.

Автори [14], з метою дослідження протипожежного захисту складів із стелажним зберіганням, провели серію із семи випробувань з використанням чотирьох прототипів спринклерів швидкого реагування. Метою проведення випробувань було визначення характеристик спринклерів, які необхідні для гасіння пожеж у чотирьохярусних стелажах висотою 9,14 м. Спринклери мали номінальний К-фактор 11 або 14, а тиск на виході спринклера підтримувався на рівні 345 кПа. В якості пожежної навантаги використовували полістирольні стакани, упаковані в коробки. Їх розташовували в двоярусних сталевих стелажах шириною в два піддони, глибиною в два піддони і висотою в чотири яруси. Осередки займання влаштовували у трьох різних місцях відносно спринклерів. Розподіл води спринклером, за умови відсутності пожежі, та силу тяги в центрі розпилювача було визначено як ключові параметри характеристик спринклера. У результаті проведення випробувань було досліджено взаємозв'язки між розміром пожежі при першому спрацьовуванні спринклера, необхідною інтенсивністю вогнегасної речовини, що подається, розподілом води спринклером і силою тяги в центрі розпилювача. В процесі випробувань при формуванні осередку займання безпосередньо під спринклером необхідно було досягти такої інтенсивності подавання води, яка б пододала теплові конвективні потоки і забезпечила потрапляння води в зону горіння. У випадку проведення випробувань, коли тепловий конвективний потік у струмені розпиленої води був більший за інтенсивність подавання вогнегасної речовини, а середній потік води над верхньою поверхнею масиву пожежної навантаги в умовах відсутності пожежі був більшим за необхідну інтенсивність, було досягнуто локалізацію пожежі. У випадку проведення випробувань із формуванням осередку займання під двома або чотирма спринклерами, тепловий конвективний потік був здебільшого обмежений простором, утвореним у центрі складування коробок з пожежною навантагою, і більша частина води, що подавалась на гасіння, потрапляла на поверхні коробок верхнього ярусу, не проходячи через нього. Таким чином очікувалося, що вимірний потік води над верхньою поверхнею пожежної навантаги в умовах відсутності пожежі буде близьким до потоку, що подається під час

пожежі. Результатом проведених випробувань було досягнення гасіння пожежі за допомогою спринклерної системи, вогнегасна речовина якої подавалась на поверхні верхнього ярусу та бічні відкриті поверхні пожежної навантаги. Коли середня інтенсивність подачі води над верхньою поверхнею пожежної навантаги в умовах відсутності пожежі була більшою, ніж необхідна інтенсивність подачі води, було досягнуто гасіння займання.

У роботі [15] авторами досліджується розвиток пожежі у приміщенні складу із стелажним зберіганням. У вказаних складах пожежна навантага на стелажах укладається вертикально. Дослідження показали, що на складі стелажного типу, коли висота зберігання велика, а товари складені шарами, виявлення пожежі відбувається із затримкою. Вода, яка подається на гасіння через спринклерні зрошувачі і розбризкується, важко проникає до осередку пожежі. Автори [15] проаналізувавши випадки пожеж стелажних складів, що сталися в Кореї, дійшли висновку, що в результаті використання систем пожежної сигналізації для виявлення займання та автоматичних спринклерних систем, які встановлюються відповідно до положень Кореї, важко виявити та локалізувати пожежу на складі стелажного типу.

У статті [16] автори представили експериментальні дослідження щодо пошуку оптимального методу виявлення пожежі на ранній стадії її розвитку на складі стелажного типу. Дослідники на експериментальній конструкції стійкового типу з чотирма поверхнями заввишки 13,5 м і провели експерименти, які мали на меті виміряти потік тепла та диму в конструкції стійкового типу та час спрацювання пожежних сповіщувачів. Сповіщувачі, які використовувалися в експериментах, були тепловими, вимірювання швидкості підйому диму, проводилось фотоелектричним детектором диму, детектором диму у відібраних пробах повітря та детектором полум'я. Джерелами займання, що використовуються в експериментах, були полум'я н-гептан для визначення швидкості поширення тепла і полум'я і бавовна для визначення швидкості поширення диму. Теплові, димові пожежні сповіщувачі та сповіщувачі полум'я були встановлені на кожному рівні стелажу. Результати досліджень показали, що теплові сповіщувачі слід встановлювати кожні 2 рівні, а димові пожежні сповіщувачі слід встановлювати кожні 4 рівні для раннього виявлення пожежі. Димові аспіраційні сповіщувачі можуть завчасно виявити пожежу, але є проблема у можливості хибного спрацювання. Теплові пожежні сповіщувачі не підходять для раннього виявлення пожежі на складі, а сповіщувач

полум'я не здатен виявити пожежу, якщо полум'я не видно, тому його потрібно встановити в комбінації з іншим сповіщувачем.

Автори у роботі [17] досліджували проблему виникнення великих матеріальних збитків від пожеж у складах із стелажним зберіганням з вертикальним типом завантаження та високою щільністю пожежної навантаги.

У цьому дослідженні було проведено експеримент із запобігання вертикальному поширенню пожежі стелажного складу з використанням горизонтального бар'єру та внутрішньостелажних спринклерів. В результаті випробування горизонтальний бар'єр перешкоджав вертикальному поширенню полум'я протягом певного часу. Однак горизонтальний бар'єр не зміг повністю перешкодити поширенню полум'я. Поєднання горизонтального бар'єру та спринклера в стійці ефективно запобігало вертикальному поширенню вогню. Крім того, було продемонстровано ефект накопичення тепла через горизонтальний бар'єр, що сприяло ранній роботі спринклерів у стійці.

У результаті було підтверджено, що ефективність локалізації вертикального поширення вогню зросла приблизно на 30%, оскільки інтервал встановлення горизонтальних бар'єрів ставав ближчим або більш частим. Крім того, в результаті вимірювання температури верхньої та нижньої частин горизонтального бар'єру розподіл температури був приблизно в 2 - 4 рази вищим у випадку, коли бар'єр був встановлений, ніж у випадку, коли його не було.

У статті [18] авторами було пояснена структура та конфігурація багатошарової спринклерної системи, запропонованої на основі трирічного дослідження пожеж у стелажному складі. Пожежа в стелажній зоні складу характеризується дуже швидким вертикальним поширенням полум'я. Для локалізації пожежі стелажного зберігання пожежний сповіщувач у стелажі повинен виявляти пожежу на надранній стадії. Електричний клапан, який розміщений біля місця виникнення пожежі, відкривається системою керування. Після відкриття клапана вода подається на гасіння з спринклерної головки відкритого типу до каналу теплового конвекційного потоку, утвореного товарами та поверхню товарів на полиці стелажу. У результаті швидкого виявлення та керування напрямом подачі води можна проводити пожежогасіння та зменшувати матеріальні втрати від пожежі при стелажному зберіганні.

Автори [19] досліджують пожежну небезпеку та схеми удосконалення складу із стелажним зберіганням з використанням автоматичного складування у зв'язку із зростанням попиту на склади з автоматизованими механізмами, які

встановлюються всередині складів, для забезпечення можливості вертикального завантаження продуктів або товарів для економії простору. Автори проаналізували пожежну небезпеку таких складів з точки зору обладнання складів різними протипожежних системами. В результаті аналізу автори встановили, що пожежна небезпека автоматизованих складів є надзвичайно високою через невизначені пожежні зони, великий об'єм, складність гасіння та виділення диму враховуючи особливості конструкції будівлі, а також через пожежну небезпеку і високу пожежну навантагу (продукцію) та можливе виникнення ефекту димової труби. Також автори у цьому дослідженні запропонували заходи для подолання цих проблем шляхом обов'язкового розрахунку пожежного навантаження.

Дослідження щодо вдосконалення критеріїв встановлення обладнання для виявлення та гасіння пожежі на складах стелажного типу представлені у роботі [20]. На складі стелажного типу, коли висота зберігання велика, а товари складені шарами, виявлення пожежі відбувається із затримкою, оскільки не ідентифікується тепло та дим, а вода, розпилена спринклерною системою, важко проникає до осередку пожежі. Крім того протипожежні системи, які встановлені відповідно до вимог положень Кореї, важко виявити та локалізувати пожежу на складі стелажного типу. Враховуючи вищевказане автори в роботі аналізують випадки пожеж, які виникли в складах із стелажним складуванням, що сталися в Кореї.

Кількість стелажних складів швидко зростає у столичному регіоні завдяки ефективному та легкому зберіганню великих обсягів товарів. Однак, усередині цих стелажних складів велика кількість горючих предметів, таких як дерево або пластик, зберігаються вертикально складеними на досить великих висотах, а оскільки предмети, що зберігаються, розташовані дуже близько один до одного, велика кількість тепла та диму утворюється під час процесу горіння у разі пожежі. Через велику кількість різноманітних горючих матеріалів пожежному сповіщувачу, встановленому на стелі, важко швидко виявити пожежу. Крім того, згідно з правилами, спринклер встановлюють на висоті від 4 до 6 м на стійці стелажа, що ускладнює проникнення води до осередку займання і, як наслідок, – ефективне гасіння пожежі. Тому автори у дослідженні [20] порівнюють та переглядають вітчизняні та іноземні стандарти протипожежних засобів і пропонують заходи для їх покращення.

Поширення пожежі у великих виробничих і складських приміщеннях досліджується у статті [21]. Основна увага дослідників була зосереджена на поширенні вогню від початкової пожежі в

стелажному сховищі до суміжної стійки без взаємодії системи пожежогасіння.

Випробування показують, що товщина матеріалу, який зберігається в стелажах, має значний вплив на поведінку горіння. Як і ширина каналу проходження диму та висота стелажа для зберігання. Ці ефекти також спостерігалися в попередніх дослідженнях, але були підтверджені у цих випробуваннях, які проводились на експериментальній установці. Місце виникнення займання впливає на розвиток пожежі та криву HRR (швидкість тепловиділення). Зокрема, на поширення полум'я впливає висота стелі складу. Визначена оптимальна відстань між товарами, що зберігаються, і стелею. Якщо відстань більша, тепловий вплив на товари зменшується. Якщо висота менша, умови горіння змінюються – знижується ефективність горіння. Теплове випромінювання впливає на час спрацьовування спринклерів. Ухил стелі має незначний вплив на роботу спринклерів. Існувала велика різниця між випробуваннями вільного горіння деревини на відкритому просторі та горінням дерев'яні у закритому приміщенні. Розмір корпусу вплинув на HRR, але відмінності зменшувалися, коли розмір корпусу збільшувався.

Дослідники зробили висновки, що відстань між штабелями, висота штабелів і вид горючої навантаги є важливим параметром для поширення вогню.

Враховуючи можливість зберігання великої кількості різноманітних вогненебезпечних матеріалів, таких як горючі рідини, газу, батареї та інші вибухонебезпечні матеріали з різними фізико-хімічними властивостями, в Україні, згідно з ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека» (додаток Г), встановлено вимоги пожежної безпеки щодо сумісного зберігання речовин і матеріалів. Можливість такого зберігання визначають на підставі кількісного врахування показників пожежної небезпеки, токсичності, хімічної активності, а також однорідності засобів пожежогасіння. Речовини і матеріали можуть бути сумісними або несумісними один з одним під час зберігання. Несумісними вважають такі речовини і матеріали, які під час зберігання сукупно збільшують пожежну небезпеку кожного з розглянутих матеріалів і речовин окремо; спричиняють додаткові труднощі під час гасіння пожежі; посилюють екологічну небезпеку під час пожежі (у порівнянні з пожежею від окремих речовин і матеріалів, взятих у відповідній кількості); вступають в реакцію взаємодії один з одним з утворенням небезпечних речовин.

Автори у роботі [22] стверджують, що в складських приміщеннях важливо класифікувати поведінку товарів при горінні та класифікувати їх

відповідно до займистості матеріалу для раннього виявлення та гасіння пожежі. У вказаному дослідженні авторами запропонований підхід до класифікації товарів, який моделює ранню стадію великомасштабних складських пожеж шляхом поділу процесу горіння на окремі процеси тепло та масообміну. Два безрозмірних параметри використовуються для представлення фізичних явищ у великому масштабі: число масопередачі, яке безпосередньо включає властивості горючого матеріалу, утворення продуктів горіння, теплове випромінювання, що спостерігається у великому масштабі. Щоб полегшити моделювання, число масопередачі (або В-число) було отримано експериментально, використовуючи вимірювання втрати маси (швидкості горіння) у стендових випробуваннях. Використовували два види палива: гофрокартон і полістирол. Гофрокартон є горючим матеріалом який, як правило запалюється першим та підтримує поширення полум'я. Полістирол зазвичай використовується як найнебезпечніший продукт під час широкомасштабних вогневих випробувань. Безрозмірне число масопередачі потім було використано для моделювання висоти полум'я в стелажі на 6,1–9,1 м (20–30 футів) при вертикальному складуванні гофрокартонних коробок «С». При проведенні дослідження спостерігалася хороша узгодженість між моделлю та широкомасштабними експериментами на початкових етапах розвитку пожежі, а також включено порівняння з попередніми кореляціями для висоти полум'я в стійці.

У роботі [23] автори досліджують пожежну безпеку тютюнових складів. Такі склади характеризуються високою пожежною навантагою. Автори провели випробування на вогнестійкість на реальному складі тютюну та запропонували для гасіння імовірних пожеж в таких складах використовувати водяний дрібнодисперсний струмінь води.

Авторами у роботі [24] було проведено дослідження переваг протипожежних відсіків на хімічних складах та їх економічної ефективності по відношенню до інших заходів протипожежного захисту. Було розроблено імовірнісну модель, яка враховує поширення пожежі всередині відсіку, поширення вогню на сусідні відсіки та загальні наслідки пожежі яка враховувала залежність площі пожежі від часу. Також була зроблена проста детермінована оцінка наслідків вибуху на стінки відсіку в результаті розгерметизації металевих бочок, що містять рідке паливо. У дослідженні розглядалися три варіанти стін: залізобетонна стіна, блокова стіна та гіпсокартонна перегородка. Модель порівнює переваги, які надають ці варіанти стін, з перевагами, які надають інші заходи протипожежного захисту, такі як виявлення (ручне

та автоматичне), автоматичне або ручне гасіння пожежі (включаючи дії пожежних підрозділів), контроль розливу та розділення. Загальні витрати були визначені для заходів протипожежного захисту з використанням інформації, наданої постачальниками та інспекторами. Модель була запущена для вибраних проєктів складів. З результатів дослідження автори зробили початкові висновки щодо вибору протипожежного захисту, а також виявлено невизначеності та слабкі сторони моделі.

Автори [25] досліджують фактори зниження ризику пожежі та стихійних лих на складі логістики бавовни на основі аналізу дерева подій і несправностей. Логістичні склади бавовни, як стверджують дослідники, невпинно збільшувалися разом із розвитком суспільства. У статті, посилаючись на пожежі на складі логістики бавовни та фізико-хімічні властивості бавовни, проаналізовано пожежну небезпеку логістичного складу бавовни та визначено джерела небезпеки. На основі аналізу дерева подій і несправностей (EFTA) вивчався механізм катастрофи логістичних складів бавовни з метою отримання коефіцієнтів зменшення небезпеки. На основі аналізу запропоновано комплекс протипожежних заходів для логістичного складу бавовни. Результати показали, що важливо контролювати температуру нижче 343 К і вологість нижче 70% під час зберігання для запобігання тління. Відсутність простору між полицями є важливим фактором, що призводить до поширення вогню. У процесі гасіння пожежі важливим є водопостачання, тому перед створенням логістичного складу для зберігання бавовни необхідно передбачити влаштування водойми для потреб пожежогасіння.

У роботі [26] автори висвітлили дослідження пожежної безпеки логістичного складу. В процесі дослідження, на основі практичних даних розвитку пожежі, визначили, що пожежі в логістичних складах є пожежами середнього рівня, а програмне забезпечення FDS (Fire Dynamics Simulator) можна використовувати для моделювання розвитку пожежі. Результати досліджень показали, що температура диму, концентрація CO та видимість безпечні для людини протягом 884с. На матеріально-технічному складі, стверджують автори, слід застосовувати бетонну колону та сталеву конструкцію з вогнезахисним покриттям, а також забезпечити евакуаційний вихід повітряною завісою та вікнами загальною площею 5% від площі огорожувальної конструкції.

Дослідники у роботі [27] аналізують пожежну небезпеку при зберіганні текстильних матеріалів і текстильних виробів. Пожежі, що виникли в місцях зберігання текстильних матеріалів і текстильних виробів, особливо у відкритих місцях

зберігання, за даними авторів, займають відносно велику частку в пожежах, що виникли на складах. У роботі приведено аналіз ризику пожежі при зберіганні текстильних матеріалів і текстильних виробів, а також причинних факторів, який є теоретичною базою для ефективної діяльності з протипожежної безпеки.

У статті [28] автори досліджують динамічну систему управління ризиками для зони зберігання легкозаймистих, вибухонебезпечних та хімічних речовин. З метою покращення здатності управління надзвичайними ситуаціями для зони зберігання небезпечних хімічних речовин була запропонована структура технічної системи управління ризиками щодо легкозаймистих та вибухонебезпечних хімічних речовин. У поєднанні з динамічними змінами небезпечних джерел аналіз ризиків для зони зберігання небезпечних хімікатів проводився на основі моделі «метелика». Метод динамічного аналізу небезпек і система класифікації були створені на основі аналізу пар набору, оновлюючи результати в реальному часі та характеристиками аварій. Було запропоновано динамічну систему моніторингу безпеки з асновану на інтеграції мережі інтернет, інформаційної технології виявлення та зондування з геоінформаційною системою (ГІС). На основі бази даних була створена система підтримки прийняття рішень щодо небезпечних хімічних речовин у надзвичайних ситуаціях, включаючи їх термін зберігання, плани надзвичайних ситуацій, інформацію про ризик тощо. Використовуючи динамічну систему управління ризиками, система може ефективно досягати мети динамічного нагляду, ідентифікації ризиків, моніторингу в режимі реального часу, а також допомоги в прийнятті рішень щодо небезпечних хімічних речовин протягом усього життєвого циклу. Усі моделі складаються з структури динамічної системи управління ризиками, включаючи ідентифікацію, класифікацію, оцінку, нагляд та управління в надзвичайних ситуаціях.

У роботі [29] автор навів аналіз системи пожежної безпеки підприємств зі зберігання небезпечних хімічних речовин. Автор стверджує, що останніми роками на складах часто трапляються пожежі та вибухи, спричинені небезпечними хімічними речовинами, наприклад вибух у складському приміщенні розміром 4×22 м у Цзіньцзяні та вибух у порту Тяньцзінь у складі розміром 8×12 м. Тому, для подальшого покращення пожежної безпеки та усунення ризиків пожежної безпеки, слід створити досконалий метод оцінки ризику пожежі. Для оцінки пожежної безпеки складу небезпечних хімікатів у статті автором запропоновано застосовувати ідентифікацію джерела небезпеки, модель пожежі та вибуху,

аналітичний процес ієрархії та оцінку безпеки за певний інтервал часу.

Дослідження, які представлені у роботі [30], спрямовані на вирішення проблеми димовидалення та можливості роботи вентиляторів під час різних пожеж у великих приміщеннях та будівлях. Видалення диму дає можливість сприяти безпечній евакуації людей в разі пожежі, збереженню майна. Таким чином, контроль та видалення диму і димових газів з будівлі є життєвоважливим компонентом будь-якої схеми протипожежного захисту. Боротьба із задимленням та управління димовидаленням є двома основними способами вирішення проблеми. Метою управління димом є створення шару диму над рівнем перебування людей. Згідно з будівельними нормами та нормами в різних країнах, цього можна досягти шляхом встановлення на покрівлі будинків димових і теплових отворів, які відкриваються при спрацюванні плавких чутливих елементів, а також автоматично після виявлення пожежі за допомогою різних типів сповіщувачів, та шляхом вилучення диму за допомогою встановлених на покрівлі вентиляторів. У Швеції рекомендуються обидва типи димовидалення залежно від класу приміщення. Рекомендується також додаткова механічна витяжна вентиляція, що забезпечує від чотирьох до шестикратного обміну повітря на годину. Очікується, що така швидкість потоку повітря вилучатиме дим приблизно з тією ж швидкістю, що й утворюється. Очікується, що ця система підтримуватиме межу між шаром диму та зоною для дихання на достатній висоті над рівнем підлоги, щоб люди могли залишити приміщення.

Однак, можливість використання звичайних систем вентиляції під час розвитку пожежі вивчено недостатньо і лише починає займати належне місце як засіб протипожежного захисту. В роботі представлено результати досліджень системи протидимної вентиляції в поєднанні з використанням звичайних систем вентиляції та відкритих дверей в одному приміщенні. Дослідження базується на розрахунках, проведених за допомогою комп'ютерних програм PFS для статичного розрахунку потоку та SIMNON для динамічного моделювання пожежі.

У роботі [31] автори приводять опис розрахунку видалення диму на складах фармацевтичної промисловості. Протипожежний захист вказаного складу складається з автоматичного спринклера та внутрішнього протипожежного водопостачання. Крім того, передбачено вікна для видалення диму в місце, яке віддалене від місця пожежі. Вентиляційна система повинна забезпечувати уповільнення, припинення опускання шару диму, утвореного пожежею в будівлі, шляхом виведення диму назовні.

Крім того, вона повинна бути розроблена відповідно до стандарту шляхом розрахунку площі вентиляційного отвору, необхідної для досягнення масової швидкості потоку через вентиляційні отвори, що дорівнює масовій швидкості утворення диму. Крім того, система повинна обмежувати опускання шару диму до проектної висоти межі шару диму. Повинні бути передбачені повітрязабірники для подачі повітря до вентиляційних систем. Повітрязабірники, що складаються із жалюзі, дверей, заслінок, вікон, віконниць або інших затверджених отворів, повинні бути спроектовані та виготовлені для забезпечення проходження зовнішнього повітря в будівлю. Масові потоки диму, входу свіжого повітря та площі вікна, необхідні для випуску диму, будуть оцінені з припущенням, якщо склад є будівлею, яка має великий об'єм, де розмір пожежі постійний. Розрахунок видалення диму проводився згідно з ASHRAE 1999 та NFPA 2001, а також стандартом SNI 03-657-2001, а мінімальний поперечний переріз площі вікна для видалення диму становить приблизно 2,64 м². Автори порівняли результат розрахунку за стандартом з емпіричним методом, він становить 7,15 м².

У статті [32] авторами запропоновано заходи для забезпечення належного рівня безпеки працівників промислового складу. Основна увага приділялась оцінці ефективності системи димовидалення. Кількісний аналіз доступного безпечного часу виходу та необхідного безпечного часу виходу проводився з використанням як простого розрахунку, так і комп'ютерного моделювання. Дослідження включало аналіз багатьох сценаріїв пожежі, включаючи варіації проектних пожеж, умов вентиляції та кількості виходів.

В дослідженні застосовувалось комп'ютерне моделювання за допомогою якого прогнозувались розвиток пожежі та поширення диму у великому складі з пропорційно- великим вентиляційним отвором. У результаті моделювання автори виявили цікаві моделі руху диму. Результат дослідження продемонстрував прийнятність альтернативного проектного рішення за встановленим критерієм.

Відомо, що найкращий спосіб мінімізувати збиток від пожежі – виявити її якомога швидше, перш, ніж вона встигне поширитись. Тому, ряд робіт присвячено саме ранньому виявленню пожежі [19, 16, 20, 21].

Відеовиявлення пожежі, стверджують автори [33], є значним внеском в ефективність систем виявлення пожежі, особливо щодо пожеж у великих приміщеннях, таких як атріуми, тунелі, склади, оскільки традиційні системи виявлення пожежі виявилися неефективними у великих приміщеннях. Для розробки систем відеоспостереження пожежі, важливі просторові, спектральні та часові

показники ідентифікації джерела пожежі. У розробці систем відеовиявлення пожежі важливими напрямками дослідження є сегментація зображення полум'я, розпізнавання, відстеження та прогнозування. Для сегментації зображень полум'я можна використовувати багатопороговий алгоритм методу Оцу та метод аналізу розподілу Релея (модифікований алгоритм сегментації). Однак, модифікований алгоритм сегментації можна посилити, щоб отримати зображення пожежі, використовуючи оптимальні порогові значення. Після такої сегментації техніку центроїдного аналізу зображень пожежі в басейні можна використовувати для розпізнавання зображень пожежі в за допомогою алгоритму найближчого сусіда (NN). Модифікована сегментація та алгоритми NN вивчаються у цій статті.

Пожежні відеоспівіснучачі найкращим чином підходить для захисту великих об'єктів і приміщень з високими стелями. Так в статті [34] розглядається можливість використання пожежних відеоспівіснучачів для захисту авіаційних ангарів. Автори зазначають, що використання пожежних відеоспівіснучачів є чудовою альтернативою традиційній системі пожежної сигналізації з пожежними співіснучачами.

Алгоритми [35] виявлення загорання використовують різні методи для визначення характеристик полум'я та диму та можуть базуватися на спектральних, просторових або часових властивостях. В статті розроблено алгоритм автоматичного виявлення полум'я на зображенні на основі аналізу пікселів кольору полум'я та площі полум'я. Проаналізовано різні зображення, на яких є полум'я у колірній моделі RGB, і визначено середнє значення їх інтенсивності і середньоквадратичне відхилення. Експериментальні дослідження в програмному середовищі MATLAB показують працездатність розробленого алгоритму.

Невід'ємною умовою уникнення збитків від пожеж на складах або принаймні їх мінімізації, підкреслюють автори у роботі [36], є раннє виявлення пожежі за допомогою систем протипожежного захисту, а також своєчасна її локалізація. Від того, які пожежні співіснучачі обрані для захисту відповідних приміщень і де вони встановлені, залежить час спрацьовування всіх елементів систем протипожежного захисту при пожежі. На основі аналізу літературних джерел дослідники [36] стверджують, що на даний момент відсутній комплексний підхід до вибору оптимального розміщення елементів вказаних систем на складах. Крім того, недостатньо вивчено оптимальне розташування пожежних співіснучачів у приміщенні з урахуванням типу пожежного навантаження. Автори досліджують

залежність часу спрацьовування різних типів пожежних сповіщувачів від виду горючого матеріалу, а саме його масової швидкості вигорання, відстані та висоти розташування сповіщувачів від потенційного місця пожежі. У вказаній роботі описано процедуру проведення експериментального дослідження для визначення відповідної залежності для складів. Результати експериментів показали, що найбільш ефективними на складах є лінійні пожежні димові сповіщувачі та аспіраційні димові пожежні сповіщувачі. За результатами повнофакторного експерименту побудовано нелінійні емпіричні залежності для визначення часу спрацьовування димових пожежних сповіщувачів від вищевказаних факторів. Отримані емпіричні залежності дають можливість підібрати пожежні сповіщувачі та оптимально розташувати їх у приміщенні. Середня похибка цих залежностей порівняно з експериментальними даними становить 6,9%. Використання отриманих залежностей дає змогу зменшити час спрацьовування пожежних сповіщувачів на 14 с порівняно з їх розташуванням, згідно з будівельними нормами.

Дослідники у роботі [37] стверджують, що параметри світла та колір полум'я допомагають виявити пожежу. Виявлення пожежі за допомогою кольорової інформації застосовують у багатьох областях. Метод на основі кольорової моделі, який використовується для виявлення пожежі, має багато переваг перед звичайними методами виявлення диму. Для покращення параметрів ефективності виявлення полум'я на основі живого відеопотоку автори пропонують ефективний метод виявлення пожежі на основі кольорової моделі. Кожен піксель перевіряється на наявність або відсутність пожежі за допомогою кольорних характеристик, а також аналізується періодична поведінка в областях пожежі. Можливі області пожежі виявляються за допомогою хроматичних та динамічних вимірювань.

У роботі [38] розглянуто потенціал штучного інтелекту (ШІ) для виявлення та розпізнавання пожеж і зменшення часу виявлення за допомогою виявлення об'єктів у потоці зображень. За останні шість років виявлення об'єктів зробило величезний стрибок у швидкості та точності, завдяки чому виявлення в реальному часі стало можливим. Для цієї мети дослідники зібрали та позначили відповідні дані з кількох загальнодоступних джерел, які були використані для навчання та оцінки кількох моделей на основі популярного детектора об'єктів «YOLOv4». Автори [38] співпрацюють з промисловим партнером, щоб реалізувати свої дослідження в умовах промислового складу, який має велику висоту. Недоліком традиційних сповіщувачів диму в цій установці є те, що дим повинен підніматися на достатню висоту. Моделі

штучного інтелекту, запропоновані в цьому дослідженні, зуміли перевершити ці сповіщувачі на значний проміжок часу, що могло б скоротити час виявлення пожежі допомогти мінімізувати наслідки від неї.

Автори [39] надають увагу використанню систем протипожежного захисту в приміщеннях складів. Автори розробили математичну модель і методику визначення оптимальної кількості засобів системи протипожежного захисту складських приміщень закритого типу, на основі яких можна визначити заходи із вдосконалення цієї системи. Суть розробленої методики полягає у визначенні необхідної кількості засобів протипожежного захисту, відповідно до стандартів, визначенні ймовірності відмови протипожежного захисту та визначенні оптимальної кількості засобів протипожежного захисту для забезпечення значення ймовірності відмови в допустимих межах. Критеріями оптимізації обрано прямі збитки від пожежі та витрати пожежно-рятувальних підрозділів на її гасіння. Вхідними даними при використанні математичної моделі є розрахункова кількість засобів протипожежного захисту відповідно до норм і стандартів.

Розроблена методика, яку пропонують автори [39] дає можливість прогнозувати ймовірність відмови протипожежної системи забезпечити пожежну безпеку об'єктів охорони та її наслідки для людей і матеріальних цінностей, що дуже важливо для забезпечення можливості швидкого реагування у разі виникнення пожежі. Також результатом застосування методики є оптимальна кількість засобів пожежогасіння на об'єкті, що забезпечує прийнятне значення ймовірності відмов. Ця методика застосована на прикладі існуючого логістичного складу, на якому змонтовані системи протипожежного захисту. Результати моделювання свідчать, що на об'єкті необхідно збільшити кількість пожежних сповіщувачів до 70 шт., пристроїв димовидалення – до 3 шт., вертикальних завіс – до 4 шт., обладнати аераційні лампи в кількості 4 шт.

У роботі [40] автори розглянули впровадження протипожежної безпеки на складі. Зокрема, було розраховано та обговорено різні важливі параметри, такі як коефіцієнт тертя труб, коефіцієнт k спринклера підвісного типу. Трубопроводи розраховувались з різними номінальними діаметрами отворів і довжиною труб для підтримки постійної швидкості потоку. Спринклери підвісного типу були встановлені на однаковій відстані, щоб охопити логістичну зону складу. Встановлено, що розроблена система забезпечує рівномірну щільність води зі швидкістю 24,39 мм/хв через спринклерну систему. Згідно з рекомендованим стандартом

Бюро індійських стандартів із будівництва та безпеки, для складу було розроблено та розраховано необхідну кількість мінімального коефіцієнта щільності протипожежного розриву складу. Ця спринклерна система здатна ліквідувати пожежу або мінімізувати збитки до приїзду пожежників.

Дослідники [41] за допомогою пристрою ADD (витратоміра), оснащеного імітатором пожежного шлейфу, експериментально вивчають фактичну витрату води для пожеж у складах стелажного зберігання. Досліджувані змінні включали витрату води спринклерів (76-212 л/хв), потужність теплового випромінювання (0, 500, 1000, 1500 і 2000 кВт), відстань до стелі (3,05, 4,57 і 6,10 м) і місця займання (осередок пожежі) (по центру нижче одного спринклера та нижче чотирьох спринклерів). Відстань між спринклерами встановлювалась 3,05 м для всіх випробувань. Результати вимірювань свідчать про те, що фактична витрата води зменшилась при збільшенні відстані від стелі з 3,05 м до 6,10 м. Дані ADD були задовільно корельовані за допомогою двох параметрів. Один параметр відповідає відношенню розміру краплі, а інший – відношенню імпульсу бризок до імпульсу вогняного струменя. Продемонстровано, що ADD можна використовувати для інтерпретації ефективності стандартних спринклерів під час проведення великомасштабних пожежних випробувань складів із стелажним зберіганням.

Автоматичні спринклерні системи, зазначають автори у роботі [42], є основною системою протипожежного захисту для складів і складських приміщень. Ефективність цієї стратегії була піддана сумніву на семінарах Національного фонду досліджень протипожежного захисту. Ці занепокоєння виникли через зростаючі проблеми, пов'язані з сучасними складськими приміщеннями, включаючи збільшення висоти та площі зберігання, використання автоматизованих систем зберігання (ASRS), обмеження в доступних запасах води та зміни в стратегіях пожежогасіння. Застосування пристроїв пожежної сигналізації, що використовуються для раннього попередження та оповіщення про пожежі, що виникають на складах, розглядається як складова сучасного протипожежного захисту складів.

Еколого-економічні ризики протипожежного захисту складів і резервуарних парків досліджено у роботі [43]. Зокрема, у статті розглядаються способи пожежогасіння складських приміщень, екологічні, економічні ризики їх застосування та шляхи мінімізації можливих впливів. Це пов'язано з тим, що вогнегасники, які використовуються, не є екологічно безпечними і завдають шкоди навколишньому середовищу і людині. Аналіз існуючих систем протипожежного захисту

резервуарів показав, що всі способи пожежогасіння мають недоліки і загалом є шкідливими для навколишнього середовища.

У роботі [44] автори представили дослідження часу спрацювання спринклерної системи в логістичному складі під впливом порожнистого перекриття стелажів. Галузь логістики швидко розвивалася, і тому з'явилася велика кількість логістичних складів, які використовують мезонінні стелажні системи. У статті аналізується температура диму під впливом порожнистої панелі мезонінної стелажної системи через процес поширення диму та оцінюється порожнистість 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% і 50%. Завдяки моделюванню FDS (Fire Dynamics Simulator) результати підтверджують, що разом із зменшенням порожнистості та збільшенням відстані температура диму поступово знижується. Крім того, існує функціональний зв'язок між температурою спрацювання автоматичної спринклерної системи та розміром порожнистості стелажу. За результатами досліджень були зроблені такі висновки:

– під час пожежі на складі логістики температура димових газів на стелі знижується зі зменшенням порожнистості та відстані. Крім того, конструкція повинна забезпечувати розміщення розпилювальної головки безпосередньо над порожнистістю;

– у разі проектування джерела полум'я існує чіткий функціональний зв'язок між робочою температурою та швидкістю спрацювання спринклерної системи.

Висновки

1. Згідно з проведеними дослідженнями та стандартами для захисту логістичних складів рекомендуються заходи із покращення пожежної безпеки логістичних складів, а саме: організація зберігання товарів, що дає можливість запобігти утворенню перешкод для доступу зрошувачів до полум'я та забезпечити ефективність роботи систем пожежогасіння; проведення перевірок та вчасне обслуговування протипожежного обладнання для запобігання непередбачуваним несправностям в системах пожежогасіння; проведення навчання та тренувань працівників щодо правил пожежної безпеки та дій у разі виникнення пожежі; оснащення новітніми системами протипожежного захисту з урахуванням останніх наукових досліджень.

2. Ризики, пов'язані з виникненням пожеж на логістичних складах, демонструють потребу в дослідженні і розробці більш ефективних систем протипожежного захисту на основі новітніх технологій: системи виявлення загорання з використанням аспіраційних пожежних сповіщувачів, вмонтованих в стелажі інтелектуальних точкових пожежних сповіщувачів; систем пінного та водяного

пожежогасіння з особливим розташуванням зрошувачів, яке передбачає їх розміщення в центрі простору, утвореного матеріалами зберігання. Особлива увага приділяється використанню пожежних відеоспівіснувачів, які використовують алгоритми виявлення загорання використовуючи різні методи визначення характеристик полум'я та диму, базуючись на спектральних, просторових або часових властивостях.

3. Для забезпечення ефективного захисту логістичних складів за допомогою систем виявлення загорання з використанням аспіраційних пожежних співіснувачів та пожежних відеоспівіснувачів необхідно провести додаткові дослідження, які дозволять відповісти на питання щодо швидкості виявлення загорання, ймовірності помилкових спрацювань від різних завод, а також місця його встановлення. При використанні пожежних відеоспівіснувачів необхідно врахувати те, що в Україні відсутня нормативна база щодо їх застосування, а міжнародні нормативні документи не дають вичерпних вимог до впровадження пожежного відеоспівіснення для захисту об'єктів. Аналогічні дослідження необхідно провести до проектування і використання систем пожежогасіння, які дозволяють ефективно здійснювати гасіння пожеж.

Список літератури:

1. Sangamithra S. et al. Design and Implementation of PLC based water Curtain Nozzle Controller for Warehouse Application // 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). – IEEE, 2021. P. 715-718. DOI:10.1109/ICCMC51019.2021.9418307.
2. Woon Hyung Kim, Eun-Gu Ham, Dong-Hun Seo. A improvement plan for fire fighting activity of rack-type warehouse based on case study and field interview. Journal of the Society of Disaster Information Vol.15, Issue 1,2019. P. 67-75. DOI: 10.15683/KOSDI.2019.03.31.67.
3. Szymonik Andrzej. Warehouse safety. Logistics and Transport, 2018. 38(2): P.101-112. DOI: 10.26411/83-1734-2015-2-38-11-18.
4. Long Ding, Faisal Khan, Jie Ji «Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards». Process Safety and Environmental Protection 135 (2020): 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.008/>
5. Shaoyun Ren. «Assessment on Logistics Warehouse fire Risk based on Analytic Hierarchy Process». Procedia Engineering 45 (2012): P.59-63. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.121>.
6. О. І. Петренко, Д. О. Сичков, Управління складською діяльністю промислових підприємств на логістичних засадах. Ефективна економіка № 6, 2017, м. Київ
7. ДБН В.2.2-43:2021 Будівлі та споруди. Складські будівлі. Основні положення [Чинний з 01.09.2022]. Київ: Державне підприємство "Укрархбудінформ", 2022. 24 с.
8. Zhu Yuanzhang, Shan Tian Yun, Byung Kuk Ahn A Study on architectural countermeasures of maintenance aspect for the fire fighting activity in the sandwich panel warehouses. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2017. Vol. 17(6). P. 11-18. DOI:10.9798/KOSHAM.2017.17.6.11.
9. Kim, Hee-Kyu; Park, Sang-Hyun; Jung, Tae-Ho. A Study on the Alternatives for Fire Safety Management by Warehouse Fire Analysis. Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference, 2009. P.598-605.
10. Jong-Hoon Kim, W. Joung, S. Myoung, Keesin Jeong, Woon-Hyung Kim Design of Concentrated Sprinkler for Rack Storage //Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2018. Vol. 18(4). P. 203-208.
11. Myoung, Sangyoub, and Keesin Jeong. Concentrated watering sprinkler system for rack-type warehouses. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2018. Vol. 18(5). P. 105-111. DOI: /doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.5.105.
12. Haukur Ingason. Plume flow in high rack storages. Fire safety journal. 2001. Vol. 36(5). P. 437-457. DOI: /doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00007-8.
13. LeeNone Y. S. et al. A Study on the Optimal Design of a Sprinkler System for Rack-Type Automatic Warehouses According to the Pipe Design Methods. Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 2018. T. 12. №. 2. P. 112-120. DOI: 10.12972/JKIAEBS.20180010.
14. Kung H. C. et al. Four-tier array rack storage fire tests with fast-response prototype sprinklers. Fire Safety Science, 1989. T. 2. P. 633-642. DOI:10.3801/IAFSS.FSS.2-633.
15. Choi KO, Choi DM A Study on Improvement of Installation Provision for Fire Detection and Suppression System in Rack-Type Warehouse. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2018. T. 18. No. 4. P. 209-213. DOI: 10.9798/KOSHAM.2018.18.4.209
16. Choi K. O., Kim D. S., Hong S. H. An Experimental Study on the Optimum Installation of Fire Detector for Early Stage Fire Detecting in Rack-Type Warehouses. Journal of the Korean Society of Safety, 2017. T. 32. №. 2. P. 38-45. DOI:10.5281/zenodo.1340160.
17. Yeo I. H., Cho G. H. Application of Horizontal Barrier on a Rack to Reduce Fire Spread // Fire Science and Engineering, 2017. T. 31. №. 4. C. 71-79. DOI:10.14346/JKOSOS.2019.34.5.15.
18. Kim J. H. et al. Design of Concentrated Sprinkler for Rack Storage //Journal of the Korean

- Society of Hazard Mitigation, 2018. Т. 18. №. 4. P. 203-208. DOI:10.9798/KOSHAM.2018.18.4.203.
19. Lee, Y.S., Ahn, Y.C., Nam, Y.J., You, D.K., Kwark, J.H. (2017). A Study on the fire hazard and improvement schemes of a Rack-type automatic warehouse, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 21(3). P. 19-29.
20. Ki-Ok Choi i Don-Mook Choi. «A Study on Improvement of Installation Provision for Fire Detection and Suppression System in Rack-Type Warehouse». *Korean Society of Hazard Mitigation* 18(4). P.209-213. DOI: 10.9798/KOSHAM.2018.18.4.209.
21. Anders Lönnermark, Haukur Ingason. *Fire Spread in Large Industrial Premises and Warehouses // SP Swedish National Testing and Research Institute* 2005. P -60.
22. Overholt, KJ et al. Warehouse commodity classification from fundamental principles. Part II: Flame heights and flame spread. *Fire safety journal*, 2011. Т. 46. №. 6. P. 317-329. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.05.002.
23. Luo, Tinade, Jing Qiao, and Beihua Cong. The Application and Experiment of High-Pressure Water Mist Fire Extinguishing System in the Tobacco Industry. *Proceedings of the Second International Conference on Mechatronics and Automatic Control*. Springer International Publishing, 2015. DOI:10.1007/978-3-319-13707-0_133.
24. Tyldesley A., Rew P. J., Houlding R. C. Benefits of fire compartmentation in chemical warehouses. *Process Safety and Environmental Protection*, 2004. Т. 82. №. 5. P. 331-340. DOI:10.1205/psep.82.5.331.44195.
25. Wen-hui Ju. Study on Fire Risk and Disaster Reducing Factors of Cotton Logistics Warehouse Based on Event and Fault Tree Analysis. *Procedia Engineering*, 2016. Т. 13. №. 5. P. 418-426. DOI:10.1016/j.proeng.2016.01.150.
26. Wu Jian-qiang, Zhang Lei, Zhu Guo-qing Performance-based Evaluation on the Logistics Warehouse. *Procedia Engineering*, 2011. № 11. P. 522-528. DOI:10.1016/j.proeng.2011.04.691.
27. Jian-yun Ma Analysis on the Fire Risk Existing in the Storage of Textile Materials and Textile Goods. *Procedia Engineering*, 2014. № 71. P. 271-275. DOI:10.1016/j.proeng.2014.04.039.
28. Xuanya Liu, Jingjing Li , Xinwei Li Study of dynamic risk management system for flammable and explosive dangerous chemicals storage area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017. №49. P. 983-988. DOI:10.1016/j.jlp.2017.02.004.
29. Cong Zhang. Analysis of Fire Safety System for Storage Enterprises of Dangerous Chemicals. *Procedia Engineering*, 2018. №211. P. 986-995. DOI:10.1016/j.proeng.2017.12.101.
30. Gordonova P. Smoke and fire gases venting in large industrial spaces and stores. Division of Building Services, Department of Building and Environmental Technology, Lund Institute of Technology, Lund University, 2004. Report relates.
31. Supriyono, Toto and Mulyajaya, Herry SMOKE RELEASE MANAGEMENT IN A WAREHOUSE. *Annual Engineering Seminar* 2011, 1 (1). P.57-C60. ISSN 978-602-98726-0-6.
32. Yaping He et al. Smoke venting and fire safety in an industrial warehouse. *Fire Safety Journal*, 2002. Т. 37. №. 2. P. 191-215. DOI: 10.1016/S0379-7112(01)00045-5.
33. Wong AKK, Fong NK Experimental study of video fire detection and its applications. *Procedia engineering*, 2014. Т. 71. P. 316-327. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.046.
34. Оношко І. А., Кушнір А. П., Вовк С. Я., Кобко В. А. Аналіз можливостей підвищення протипожежного захисту авіаційних ангарів шляхом вдосконалення високотехнологічних систем виявлення пожежі. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. №43. С. 99-112. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.12>.
35. Кушнір А.П., Копчак Б.Л. Створення алгоритму автоматичного виявлення полум'я на основі комп'ютерного зору з використанням програмного середовища MATLAB. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. Львів, ЛДУ БЖД, 2020. №36. С. 49-58. DOI: 10.32447/20786662.36.2020.05
36. Sharyy V., Pasnak I., Renkas A. Optimizing Process of Fire Detection in Warehouses Fire Detectors // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. Т. 2. №. 10. P. 116. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254620.
37. Hatekar A. et al. Fire detection on a surveillance system using Image processing. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2017. Т. 6. No. 05. DOI: 10.17577/IJERTV6IS050094.
38. Otto Zell et al. Image-Based Fire Detection in Industrial Environments with YOLOv4. *arXiv preprint arXiv:2212.04786*. 2022. DOI:10.48550/arXiv.2212.04786
39. Hulida, Edward, et al. Engineering method for determining rational fire protection parameters of warehouses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Т. 2. №. 10. P. 104. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.201819.
40. Deepak Chhabra Implementation of Fire Fighting and Safety in Warehouse. *International Journal of Research and Development in Engineering, Science and Management*, 2016. 3. №. 7. P. 193-207.
41. Chan T. S., Kung H. C. Comparison of actual delivered density and fire suppression effectiveness of

standard and conventional sprinklers in rack-storage fires. *Fire Safety Science*, 2003. T. 7. P. 445-456. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.7-445.

42. Joshua Dinaburg, Daniel T. Gottuk. Fire detection in warehouse facilities. Springer New York, 2012. P. 1-59. DOI: 10.1007/978-1-4614-8115-7_1

43. Evgeniy Degaev et al. Ecological and Economic Risks of Fire Protection of Warehouses and Tank Parks. MATEC Web of Conferences. 251. EDP Sciences, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201825106013.

44. Yaxin Tan et al. Study on the response of sprinkler system in logistics warehouse under the influence of the hollow floorboard. *Case Studies in Thermal Engineering* 14, 2019: 100427. DOI:10.1016/j.csite.2019.100427.

References

1. Sangamithra, S., Sakitha, S., Rajasree, R., & Titus, T. J. (2021, April). Design and Implementation of PLC based water Curtain Nozzle Controller for Warehouse Application. In 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC) (pp. 715-718). IEEE DOI:10.1109/ICCMC51019.2021.9418307.

2. Kim, W. H., Seo, D. H., & Ham, E. G. (2019). A improvement plan for fire fighting activity of rack-type warehouse based on case study and field interview. *Journal of the Society of Disaster Information*, 15(1), 67-75.. DOI: 10.15683/KOSDI.2019.03.31.67.

3. Szymonik, A. (2018). Warehouse safety. *Logistics and Transport*, 38(2), 101-112. DOI: 10.26411/83-1734-2015-2-38-11-18.

4. Ding, L., Khan, F., & Ji, J. (2020). Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards. *Process safety and environmental protection*, 135, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.008>.

5. Ren, S. (2012). Assessment on logistics warehouse fire risk based on analytic hierarchy process. *Procedia Engineering*, 45, 59-63. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.121>.

6. Petrenko O.I., Sychkov D.O. (2017) Upravlinnya skladskoy diyalnisty promyslovyh pidpryemstv na logistychnyh zasadah. Management of warehouse activity of industrial enterprises on a logistic basis. Efficient economy. (6).

7. Budivli ta sporudy. Skladsky budivli. Osnovni polozennya. Buildings and structures. Warehouse buildings. Substantive provisions (2021) DBN B.2.2-43:2021 from 1th september 2022. Kyiv: State Enterprise Ukrarhbudininform, [in Ukrainian].

8. 주환장, 상천윤, & 병국안. (2017). A Study on architectural countermeasures of maintenance aspect for the fire fighting activity in the sandwich panel warehouses. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(6), 11-18.

DOI:10.9798/KOSHAM.2017.17.6.11.

9. Kim, H. K., Park, S. H., & Jung, T. H. (2009). A study on the alternatives for fire safety management by warehouse fire analysis. In *Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference* (pp. 598-605). Korean Institute of Fire Science and Engineering.

10. Kim, J. H., Joung, W. I., Myoung, S. Y., Jeong, K., & Kim, W. H. (2018). Design of Concentrated Sprinkler for Rack Storage. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), 203-208.

11. Myoung, S., & Jeong, K. (2018). Concentrated watering sprinkler system for rack-type warehouses. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(5), 105-111. DOI: /doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.5.105.

12. Ingason, H. (2001). Plume flow in high rack storages. *Fire safety journal*, 36(5), 437-457. DOI:/doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00007-8.

13. Lee, Y. S., Kwark, J. H., Kim, H. S., You, D. K., & Ahn, Y. C. (2018). A Study on the Optimal Design of a Sprinkler System for Rack-Type Automatic Warehouses According to the Pipe Design Methods. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 12(2), 112-120. DOI:10.12972/JKIAEBS.20180010.

14. Kung, H. C., Yu, H. Z., Brown, W. R., & Vincent, B. G. (1989). Four-tier array rack storage fire tests with fast-response prototype sprinklers. *Fire Safety Science*, 2, 633-642. DOI:10.3801/IAFSS.FSS.2-633.

15. Choi, K. O., & Choi, D. M. (2018). A Study on Improvement of Installation Provision for Fire Detection and Suppression System in Rack-Type Warehouse. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), 209-213. DOI:10.9798/KOSHAM.2018.18.4.209

16. Choi, K. O., Kim, D. S., & Hong, S. H. (2017). An Experimental Study on the Optimum Installation of Fire Detector for Early Stage Fire Detecting in Rack-Type Warehouses. *Journal of the Korean Society of Safety*, 32(2), 38-45. DOI:10.5281/zenodo.1340160.

17. Yeo, I. H., & Cho, G. H. (2017). Application of Horizontal Barrier on a Rack to Reduce Fire Spread. *Fire Science and Engineering*, 31(4), 71-79. DOI:10.14346/JKOSOS.2019.34.5.15.

18. Kim, J. H., Joung, W. I., Myoung, S. Y., Jeong, K., & Kim, W. H. (2018). Design of Concentrated Sprinkler for Rack Storage. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), 203-208. DOI:10.9798/KOSHAM.2018.18.4.203.

19. Lee, Y. S., Ahn, Y. C., Nam, Y. J., You, D. K., & Kwark, J. H. (2017). A Study on the fire hazard and impro-vement schemes of a Rack-type automatic ware-house. *Journal of Power System Engineering*, 21(3), 19-29.

20. Choi, K. O., & Choi, D. M. (2018). A Study on Improvement of Installation Provision for Fire Detection and Suppression System in Rack-Type Warehouse. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), 209-213. DOI:10.9798/KOSHAM.2018.18.4.209.
21. Lönnermark, A., & Ingason, H. (2005). *Fire Spread in Large Industrial Premises and Warehouse*.
22. Overholt, K. J., Gollner, M. J., Perricone, J., Rangwala, A. S., & Williams, F. A. (2011). Warehouse commodity classification from fundamental principles. Part II: Flame heights and flame spread. *Fire Safety Journal*, 46(6), 317-329. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.05.002.
23. Luo, T., Qiao, J., & Cong, B. (2015). The Application and Experiment of High-Pressure Water Mist Fire Extinguishing System in the Tobacco Industry. In *Proceedings of the Second International Conference on Mechatronics and Automatic Control* (pp. 1197-1207). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-13707-0_133.
24. Tyldesley, A., Rew, P. J., & Houlding, R. C. (2004). Benefits of fire compartmentation in chemical warehouses. *Process Safety and Environmental Protection*, 82(5), 331-340. DOI: 10.1205/psep.82.5.331.44195.
25. Ju, W. H. (2016). Study on fire risk and disaster reducing factors of cotton logistics warehouse based on event and fault tree analysis. *Procedia Engineering*, 135, 418-426. DOI:10.1016/j.proeng.2016.01.150.
26. Jian-qiang, W., Lei, Z., & Guo-qing, Z. (2011). Performance-based evaluation on the logistics warehouse. *Procedia Engineering*, 11, 522-528. DOI:10.1016/j.proeng.2011.04.691.
27. Ma, J. Y. (2014). Analysis on the fire risk existing in the storage of textile materials and textile goods. *Procedia engineering*, 71, 271-275. DOI:10.1016/j.proeng.2014.04.039.
28. Liu, X., Li, J., & Li, X. (2017). Study of dynamic risk management system for flammable and explosive dangerous chemicals storage area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 983-988. DOI:10.1016/j.jlp.2017.02.004.
29. Zhang, C. (2018). *Analysis of fire safety system for storage enterprises of dangerous chemicals*. *Procedia engineering*, 211, 986-995. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.101.
30. Gordonova, P. (2004). Smoke and Fire Gases Venting in Large Industrial Spaces and Stores.
31. Supriyono, T., & Mulyajaya, H. (2011). Smoke Release Management in A Warehouse. In *Annual Engineering Seminar 2011* (Vol. 1, No. 1, pp. C 57-C60). Fakultas Teknik UGM.
32. He, Y., Wang, J., Wu, Z., Hu, L., Xiong, Y., & Fan, W. (2002). Smoke venting and fire safety in an industrial warehouse. *Fire Safety Journal*, 37(2), 191-215. DOI: 10.1016/S0379-7112(01)00045-5.
33. Wong, A. K., & Fong, N. K. (2014). Experimental study of video fire detection and its applications. *Procedia engineering*, 71, 316-327. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.046.
34. Onoshko I.A., Kushnir A.P., Vovk S.Y., Kobko V.A. (2023) Analysis of the possibilities of increasing fire protection of aircraft hangars by improving high-tech fire detection systems. *Fire safety: Collection of scientific papers*. 43. 99-112. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.12>.
35. Kushnir A.P., Kopchak B.L. (2020) Creation of an automatic flame detection algorithm based on computer vision using the MATLAB software environment. *Fire safety: Collection of scientific papers*. 36. 49-58. DOI:10.32447/20786662.36.2020.05.
36. Sharyy V., Pasnak I., Renkas A. (2022) Optimizing Process of Fire Detection in Warehouses Fire Detectors //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 10. 116. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254620.
37. Hatekar, A., Manwani, S., Patil, G., & Parekh, A. (2017). Fire detection on a surveillance system using Image processing. *International Journal of Engineering Research & Technology (ijERT)*, 6(05). DOI: 10.17577/IJERTV6IS050094.
38. Zell, O., Pålsson, J., Hernandez-Diaz, K., Alonso-Fernandez, F., & Nilsson, F. (2022). Image-Based Fire Detection in Industrial Environments with YOLOv4. *arXiv preprint arXiv: 2212.04786*. DOI:10.48550/arXiv.2212.04786.
39. Hulida, E., Pasnak, I., Renkas, A., & Sharyy, V. (2020). Engineering method for determining rational fire protection parameters of warehouses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10), 104. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.201819.
40. Kumar, N., & Chhabra, D. (2016). Implementation of fire fighting and safety in warehouse. *International Journal of R&D in Engineering, Science and Management*, 3(7), 193-207.
41. Chan, T. S., & Kung, H. C. (2003). Comparison of actual delivered density and fire suppression effectiveness of standard and conventional sprinklers in rack-storage fires. *Fire Safety Science*, 7, 445-456. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.7-445.
42. Dinaburg, J., Gottuk, D. T., Dinaburg, J., & Gottuk, D. T. (2012). *Fire detection in warehouse facilities* (pp. 1-59). Springer New York.

DOI: 10.1007/978-1-4614-8115-7_1

43. Degaev, E., Orlov, A., El Haddad, P., & Pleshivtsev, A. (2018). Ecological and Economic Risks of Fire Protection of Warehouses and Tank Parks. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 251, p. 06013). EDP Sciences.

DOI:10.1051/mateconf/201825106013.

44. Tan, Y., Li, J., Li, Y., & Huang, Y. (2019). Study on the response of sprinkler system in logistics warehouse under the influence of the hollow floorboard. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100427. DOI:10.1016/j.csite.2019.100427.

© О. В. Шаповалов, С. Я. Вовк, Н. О. Ференц
І. А. Оношко, Ю. В. Кіндрацький, 2024.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 01.04.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.