

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

**КОВАЛЬ ОЛЕКСАНДР МИРОСЛАВОВИЧ**



УДК 621.3

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ  
НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ**

21.06.02 – пожежна безпека

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій, м. Харків.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Гуліда Едуард Миколайович**,  
Львівський державний університет  
безпеки життєдіяльності,  
завідувач кафедри пожежної тактики  
та аварійно-рятувальних робіт.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Басманов Олексій Євгенович**,  
Національний університет  
цивільного захисту України,  
головний науковий співробітник  
наукового відділу з проблем цивільного захисту  
та техногенно-екологічної безпеки;

доктор технічних наук, професор  
**Бєліков Анатолій Серафимович**,  
Придніпровська державна академія  
будівництва й архітектури,  
завідувач кафедри безпеки життєдіяльності;

доктор технічних наук, професор  
**Грицюк Юрій Іванович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
професор кафедри програмного забезпечення.

Захист відбудеться «26» жовтня 2017 року о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевського, 94.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевського, 94.

Автореферат розіслано «25» вересня 2017 року.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 64.707.01



А. О. Михайлюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Підвищення пожежної безпеки деревообробних підприємств та забезпечення ефективності функціонування пожежно-рятувальних підрозділів в процесі ліквідації пожеж – один з основних напрямків роботи служби ДСНС України.

Досвід розвинутих країн світу показує, що найбільшу адекватність системи забезпечення пожежної безпеки відносно специфіки того чи іншого об'єкту в умовах обмежених витрат демонструє диференційований підхід. Такий підхід потребує розроблення та практичної реалізації заходів, які враховують як пожежну безпеку об'єктів, так і їх протипожежний захист з оцінюванням систем запобігання пожеж. Даний підхід має значні переваги над іншими. Наприклад, тільки від покращення профілактичної роботи на об'єктах, які підконтрольні органам ДПН, кількість пожеж на цих об'єктах зменшилася майже в 3,4 разу.

Підвищення ефективності проведення заходів, які базуються на раціоналізації та оптимізації роботи пожежно-рятувальних підрозділів, на оцінюванні результатів пожежно-технічного обстеження та інших видів профілактичної роботи з впровадженням системного підходу до процесу аналізу цих задач, дозволить розробляти інформаційні технології стосовно тактики пожежогасіння, структурувати та уніфікувати діючі нормативні документи, розробляти інформаційні моделі для комп'ютерного моделювання.

Чимало закордонних фірм і наукових центрів спеціалізуються на розробленні інформаційних технологій та пакетів прикладних програм для пожежної охорони. Наприклад, центром пожежних досліджень Національного бюро стандартів США розроблені математичні моделі розвитку пожежі в будівлях і приміщеннях, а в Московській академії державної протипожежної служби розроблені методи розрахунку тепломасообміну при пожежі та пакети прикладних програм для їх використання в процесі практичної діяльності пожежно-рятувальних підрозділів.

Проектування деревообробних підприємств, їх протипожежний захист, дії пожежно-рятувальних підрозділів із захисту деревообробних підприємств і ліквідації пожежі регламентуються рядом нормативних документів. Але, незважаючи на заходи, які приймаються, кількість пожеж на деревообробних підприємствах залишається практично незмінною протягом останніх 10 років (90...100 пожеж за один рік). Це вказує на те, що можливо існує недостатність сил і засобів або неефективне їх використання та недостатнє врахування факторів, які впливають на виникнення та розвиток пожежі.

Для розв'язання цієї проблеми необхідно розробити комплекс математичних моделей, які будуть адекватно описувати процеси, що впливають на виникнення пожежі, на її розповсюдження, сприятимуть її локалізації і ліквідації як в закритих приміщеннях цехів, так і на відкритих складах лісоматеріалів, а також для розроблення рекомендацій пожежно-рятувальним підрозділам.

Процеси пожеж на деревообробних підприємствах досліджувалися Р.Р. Notario, F.G. Moreno, C.S. Tarifa, М.С. Артем'євим, С.В. Горшковим, Ю.І. Гришкоком, П.П. Девлишевим, М.О. Івановим, М.П. Копиловим, О.М. Курбатським; форма факела і теплове випромінювання від нього вивчалоя в роботах D. Drysdale, А.Д. Кузика, Л.М. Куценка, О.П. Созника; питання тепломасообміну досліджувалися Х.І. Ісхаковим, Е.М. Логачовим, С.В. Пузачем, Р.Ш. Хабібুলіним; питання гасіння розглядалоя в роботах І.М. Абдурагімова, Ю.О. Абрамова, А.С. Белікова, Е.М. Гуліди, О.М. Дигала, М.В. Литвина; питання оптимізації ліквідації пожежі – в роботах О.С. Басманова, Д.М. Войтовича, В.М. Груманса, Е.М. Гуліди, І.О. Доррера, С.Ф. Кривошликова, І.О. Мовчана, О.О. Смотр, О.А. Тарасенка, С.В. Ушанова та інших.

При цьому зовсім не розглядалоя моделювання пожежних ситуацій в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств з метою встановлення швидкості розповсюдження пожежі, визначення часу тривалості вільного розвитку пожежі до початку її гасіння та критичного часу пожежі, за який можливо виконати евакуацію працюючих з цеху. Аналіз робіт з визначення швидкості поширення фронту пожежі на відкритих складах лісоматеріалів штабельного зберігання показує, що на сьогодні відсутня вдосконалена методологія її визначення. Крім цього, не розглядалися питання оптимізації тактичних дій в процесі ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах.

На сучасному етапі використання обчислювальної техніки дозволяє виконувати всебічний аналіз пожежних ситуацій на деревообробних підприємствах, враховувати різні варіанти розвитку пожежі, розробляти математичні моделі, які точніше описуватимуть процес розвитку пожежі та її ліквідацію. Ці моделі дозволять визначати напрямки розповсюдження пожежі та визначати головні заходи із забезпечення деревообробного об'єкта протипожежними засобами, а також приймати раціональні заходи, що зможуть зменшити збитки від пожежі та значно підвищити ефективність дій пожежно-рятувальних підрозділів при її ліквідації.

Тому розвиток наукових основ ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах шляхом оптимізації організаційно-технічних заходів за критерієм мінімуму збитків є актуальною науковою проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідних робіт Національного університету цивільного захисту України: «Рекомендації щодо попередження та ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах» (№ ДР 0150U002038, відповідальний виконавець), «Рекомендації щодо проектування протипожежних відсіків для закритих приміщень та будівель» (№ ДР 0116U003743, виконавець), «Визначення оптимальної кількості протипожежних засобів для закритих цехів деревообробних підприємств» (№ ДР 0116U003744, виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розвиток наукових основ ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах шляхом оптимізації організаційно-технічних заходів за критерієм мінімуму збитків.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі задачі:

1) розробити математичну модель по визначенню кількості та площ пожежних відсіків приміщеннях цехів деревообробних підприємств для зменшення швидкості поширення пожежі;

2) розробити математичну модель для оцінки пожежних ситуацій процесу розвитку та поширення пожежі на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств;

3) розробити математичні моделі оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах з урахуванням надійності всієї системи пожежогасіння;

4) теоретично оцінити вогнестійкість будівельних конструкцій скатних покрівель цехів деревообробних підприємств, що дасть змогу оперативно знаходити значення критичного часу ліквідації пожежі і забезпечення міцності будівельних конструкцій;

5) розробити математичні моделі для оптимізації тактичних дій локалізації і гасіння пожежі на деревообробних підприємствах;

6) експериментально дослідити тактичні методи локалізації і гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів, оперативне розгортання сил і засобів пожежогасіння та ефективність використання вогнегасної речовини для охолодження штабелів від фронту пожежі на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств;

7) розробити оптимізаційну математичну модель для визначення методів і засобів протипожежного захисту об'єктів з метою забезпечення пожежної безпеки та підвищення ефективності ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах.

**Об'єкт дослідження** – процеси, які відбуваються під час пожеж у закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств та на відкритих складах лісоматеріалів.

**Предмет дослідження** – оптимізація дій пожежно-рятувальних підрозділів, сил і засобів при ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах та на відкритих складах лісоматеріалів.

**Методи дослідження.** У роботі використано аналітичні, статистичні та чисельні методи дослідження. Під час розгляду пожежних ситуацій у закритому приміщенні цеху та на відкритих складах лісоматеріалів застосовували теорію тепломасообміну. Чисельні методи використовували для розв'язку диференціальних рівнянь та обчислення інтегралів. Теорію планування експерименту і методи математичної статистики застосовували для раціонального планування експерименту, оброблення його результатів і визначення оптимальних значень чинників. Для розв'язування оптимізаційних задач з визначення сил і засобів ліквідації пожежі, методів

локалізації і гасіння пожежі, оптимізації протипожежних відсіків та методів і засобів протипожежного захисту об'єктів використовували ймовірнісний метод Монте-Карло з розробленням пакетів прикладних програм. Під час розгляду пожежних ризиків для деревообробних підприємств, а також надійності пожежної техніки для ліквідації пожежі використовували основні методи і положення теорії надійності. Усі розрахунки виконували за допомогою персональних ЕОМ.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у розв'язанні важливої науково-практичної проблеми розробки теоретичних основ, методів та моделей розвитку і ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах. При цьому одержано такі наукові результати:

*вперше розроблено:*

- оптимізаційну математичну модель для визначення площі і кількості пожежних відсіків в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств;

- метод визначення швидкості розвитку та поширення фронту пожежі на відкритих складах лісоматеріалів з використанням графової моделі;

- математичні моделі для оптимізації тактики та тривалості локалізації та гасіння пожежі в залежності від ситуації їх розвитку в закритих приміщеннях цехів і на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств за критерієм мінімуму збитків;

- оптимізаційну математичну модель для визначення методів і засобів протипожежного захисту об'єкта з урахуванням допустимого значення пожежного ризику для забезпечення його пожежної безпеки і підвищення ефективності ліквідації пожежі у разі її виникнення;

*удосконалено:*

- математичні оптимізаційні моделі визначення сил і засобів для ліквідації пожежі в закритих приміщеннях цехів і на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств з урахуванням надійності всієї системи пожежогасіння;

- теоретичні положення оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій скатних покрівель будівельних конструкцій деревообробних підприємств, що дає змогу оцінити значення критичного часу ліквідації пожежі і забезпечення їх міцності;

- з використанням системного підходу математичні моделі прогнозування термогазодинамічних чинників пожежі в закритому приміщенні на початковій і розвинутій стадіях, а також на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств з урахуванням виділення токсичних продуктів горіння;

*отримали подальший розвиток:*

- метод визначення критичного часу пожежі в закритих приміщеннях цехів з урахуванням варіантів пожежних ситуацій і типу форм пожежі;

– метод визначення значень складових ризиків з використанням основних положень теорії надійності і методу статистичного моделювання, який дає змогу значно підвищити точність розрахованих ймовірностей;

– методологія визначення заходів для підвищення пожежної безпеки об'єктів захисту з використанням математичної моделі і програмної системи оптимізації кількості й номенклатури протипожежних засобів з урахуванням допустимого значення пожежного ризику.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблений комплекс математичних моделей, методів та алгоритмів їх розв'язку є підставою для обґрунтування організаційно-технічних заходів, які спрямовані на запобігання поширення пожежі на деревообробних підприємствах у разі її виникнення та на підвищення ефективності її ліквідації. Виконані теоретичні й експериментальні дослідження та отримані результати дають змогу значно підвищити пожежну безпеку деревообробних підприємств і можуть бути використані безпосередньо під час ліквідації пожежі.

Використовуючи отримані в роботі математичні моделі та методи з програмно реалізованими алгоритмами, можна визначити оптимальні значення чинників щодо попередження поширення пожежі на деревообробних підприємствах і підвищити ефективність її ліквідації. Впровадження протипожежних засобів в опоряджувально-складальному цеху деревообробного підприємства (м. Самбір Львівської області, вул. В. Чорновола, 36) з використанням програмного комплексу з оптимізації вибору кількості протипожежних засобів для приміщень цехів деревообробних підприємств з урахуванням пожежного ризику дало змогу зменшити пожежний ризик для цеху в 11,3 разу та довести його значення до середнього  $2,4 \cdot 10^{-5}$ .

Математичну модель оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж на лісоскладах деревообробних підприємств і програмне забезпечення було використано при складанні сценарію проведення комплексних навчань пожежно-рятувальними підрозділами ГУ у Львівській області ДСНС України в м. Самбір на лісоскладі деревообробного підприємства. Використовуючи розроблену математичну модель, вдалося зменшити тривалість ліквідації пожежі на 32%, якщо порівняти з нормативною, а відповідно – і зменшити збитки від пожежі на 21%.

Отримані результати можуть застосовувати підрозділи ДСНС України у своїй практичній діяльності, а також науково-дослідні і проектні організації під час розроблення нормативної документації, проектування і будівництва нових видів споруд деревообробної промисловості.

Результати роботи передано для апробації та подальшого впровадження: до науково-дослідних і проектних організацій, деревообробних підприємств та головних управлінь ДСНС України, а

також впроваджені в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України та Львівського державного університету безпеки життєдіяльності при формуванні і наповненні таких дисциплін, як «Пожежна тактика», «Методологія й організація наукових досліджень» та «Основи теорії надійності і техногенний ризик».

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є результатом самостійної роботи автора. Особистий внесок здобувача в наукових роботах, які опубліковані у співавторстві, полягає в наступному. У роботі [1] в загальному сформульовано задачу оптимізації пожежних відсіків, визначено функцію мети, відповідні обмеження, розроблено блок-схему алгоритму визначення оптимальних розмірів і кількості пожежних відсіків. У роботі [2] визначено значення екологічного ризику та ймовірність евакуації людей із зони пожежі. У роботі [4] розроблено математичну модель оптимізації часу ліквідації пожеж у приміщеннях цехів деревообробних підприємств. У роботі [8] поставлено задачі дослідження, обґрунтовано вибір критерію вогнестійкості, розроблено математичні моделі визначення міцності конструкцій скатних покрівель одноповерхових будівель цехів. У роботі [10] сформульовано мету дослідження, вибрано й удосконалено математичну модель, яка дає змогу прогнозувати поширення пожежі для різних об'єктів, розглянуто три пожежні ситуації, на підставі результатів їх аналізу зроблено висновки. У роботі [13] розроблено математичну модель і блок-схему алгоритму для вибору оптимального варіанта тактики локалізації і гасіння пожеж на складах лісоматеріалів. У роботі [14] сформульовано мету дослідження, поставлено задачі дослідження, розкрито значення основних показників надійності конструктивних елементів кожного блоку пожежної техніки з використанням методу статистичного моделювання та розроблено математичні моделі для врахування надійності пожежної техніки при визначенні її кількості. У роботі [15] одержано математичну модель визначення методів і засобів протипожежного захисту для об'єкта з урахуванням допустимого значення пожежного ризику. У роботі [17] розроблено математичну модель для вибору оптимального тактичного плану локалізації і гасіння пожеж у закритих цехах деревообробних підприємств. У роботі [18] виконано експериментальні дослідження з вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, покритих наповненими силіційорганічними сполуками, отримано і проаналізовано результати досліджень. У роботі [28] за допомогою методу статистичного моделювання визначено основні параметри для встановлення надійності пожежної техніки. У роботі [31] розроблено оптимізаційну модель тактики гасіння пожеж на складах лісоматеріалів деревообробних підприємств. У роботі [33] в загальному сформульовано задачу оптимізації пожежних відсіків.



**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на IV Міжнародній науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (Черкаси, 2014); XVI Всеукраїнській конференції рятувальників (Київ, 2014); XII Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2015); семінарі УкрНДІЦЗ «Перспективи запровадження в Україні системи управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» (Київ, 2015); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури» (Київ, УкрНДІЦЗ, 2015); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки» (Харків, НУЦЗ, 2015); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (Кокшетау, КТИ МЧС РК, 2015); Міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки» (Харків, НУЦЗ, 2015); II Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства, європейський досвід і перспективи» (Львів, ЛДУ БЖД, 2015); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки» (Київ, УкрНДІЦЗ, 2016).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 21 науковій статті, з яких 3 – в закордонних виданнях, 18 наукових статтях у виданнях, які входять до переліку ДАК України (1 входить в базу Scopus), 10 тезах доповідей науково-технічних конференцій і 5 свідоцтвах на твір (комп'ютерні програми).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, восьми розділів, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації містить 467 сторінок (з них 385 сторінок основного тексту), 36 таблиць, 48 ілюстрацій, список використаних джерел із 314 найменувань та 16 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Сучасний стан проблеми забезпечення пожежної безпеки деревообробних підприємств» розглянуто виробництва деревообробної галузі, які пов'язані з механічною обробкою деревини, та проблеми забезпечення на цих виробництвах пожежної безпеки. За видами обробки деревообробну галузь можна поділити на чотири основні групи виробництв: 1) лісопильно-деревообробна; 2) клеєних матеріалів і плит; 3) виробів з деревини; 4) спеціального виробництва. Кожна із цих груп виробництв випускає відповідну продукцію. Найбільш

пожежонебезпечними спорудами є закриті цехи, у яких обробляють деревину.

У деревообробних цехах зберігаються матеріали, горіння яких супроводжується термічним розкладом (піролізом) з виділенням газоподібних продуктів та утворенням перевугленого поверхневого шару, що потовщується протягом часу горіння. Швидкість вигорання твердих матеріалів залежить не тільки від фізичної природи матеріалу, а й від геометричної структури пожежного навантаження. Наприклад, деревина може бути у вигляді брусків різного поперечного перерізу, дощок, відходів деревообробки тощо, а швидкість їх вигорання залежить від розмірів площі, на якій вони розміщені, товщини і ступеня дисперсності шару. Крім цього, швидкість вигорання в закритому приміщенні відрізняється від швидкості вигорання на відкритому просторі. Під час механічної обробки заготовок у цехах завжди утворюються й осідають на робочих місцях технологічні відходи (тріски й тирса).

Окрім закритих цехів, у яких обробляють деревину, особливо пожежонебезпечними є відкриті склади пиломатеріалів і склади круглих лісоматеріалів штабельного зберігання, кількість яких в Україні досягає 440. Загалом же за останні роки кількість деревообробних підприємств безперервно зростає, що ставить більш жорсткі вимоги для забезпечення цим підприємствам протипожежного захисту.

Аналіз пожеж на деревообробних підприємствах показав, що 64% всіх пожеж трапляються на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів (рис. 1). Такий показник пов'язаний з тим, що ці склади більш поширені, ніж деревообробні цехи.

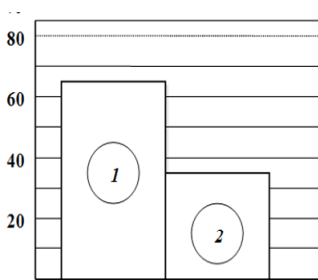


Рис. 1. Розподіл пожеж на деревообробних підприємствах: 1 – на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів (64%); 2 – у деревообробних цехах (36%)

Проаналізовано наявні моделі пожеж на деревообробних підприємствах. Вказано недоліки підходів їх використання. Особливо це стосується моделей пожеж на відкритих складах лісоматеріалів. З'ясовано, що в літературі недостатньо розглянуто питання впливу надійності пожежної техніки та спорядження на оперативно-тактичну діяльність пожежно-рятувальних служб і на процес ліквідації пожеж.

Відтак зроблено висновок, що подальший розвиток наукових основ ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах шляхом оптимізації організаційно-технічних заходів за критерієм мінімуму збитків є

перспективним напрямом для підвищення ефективності ліквідації пожеж пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС України та забезпечення протипожежного захисту деревообробних підприємств.

У другому розділі «**Моделювання пожежних ситуацій з оцінкою процесу розвитку та поширення пожежі в приміщеннях будівель деревообробних підприємств**» виконано моделювання пожежних ситуацій в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств із визначенням швидкості поширення пожежі та її критичного часу. Для цього було використано диференціальну (польову) модель, яка ґрунтується на використанні диференціальних рівнянь у часткових похідних, що описують просторово-часовий розподіл температур, швидкостей газового середовища у приміщенні, концентрацій компонентів газового середовища тощо. На підставі цієї моделі лабораторія будівельних і пожежних досліджень (BFRL) Національного інституту стандартів і технологій США розробила й ТОВ «Сітіс» удосконалило програму FDS. Ця програма була основою для розгляду й аналізу пожежних ситуацій у закритих приміщеннях цехів.

Окрім програми FDS під час розгляду моделювання пожежних ситуацій у закритих приміщеннях цехів використовували пакет прикладних програм для побудови ізотерм та ізотермічних поверхонь, тобто температури  $T_i$  в °С в будь-якій точці закритого приміщення з урахуванням температури осередку пожежі. При цьому використовували залежність Е. М. Гуліди

$$T_i = T_{o.n.} \cdot \frac{C_T \cdot G^{0,75} \cdot \tau_{в.г.}^{0,18} \cdot Z^{1,5} \cdot S_{П}^{0,13}}{R^{0,71}}, \quad (1)$$

де  $T_{o.n.}$  – температура осередку пожежі;  $G$  – пожежне навантаження у приміщенні, кг/м<sup>2</sup>;  $\tau_{в.г.}$  – час вільного горіння, хв.;  $Z$  – висота, на якій визначається температура, м;  $S_{П}$  – площа пожежі, м<sup>2</sup>;  $R$  – відстань від осередку пожежі, на якій визначається температура, м;  $C_T$  – коефіцієнт пропорційності та обезрозмірення складових елементів дробу.

Для визначення температури  $T_{o.n.}$  (°С) в осередку пожежі використовували залежність

$$T_{o.n.} = \frac{10^3 Q_{н.п.сеп} S_{П} \tau_{в.г.}}{c_{сеп} M} - 273, \quad (2)$$

де  $Q_{н.п.сеп}$  – середнє значення найнижчої робочої теплоти згорання для приміщення, у якому розглядається пожежа, МДж/(м<sup>2</sup>·хв.);  $M$  – сумарна маса матеріалів пожежного навантаження, яка знаходиться на площі

пожежі, кг;  $c_{сер}$  – середнє значення питомої теплоємності горючого навантаження, кДж/кг·К;  $\tau_{в.г}$  – поточний час вільного горіння пожежного навантаження, хв.

Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі у приміщеннях цехів деревообробних підприємств розглядали на основі опоряджувально-складального цеху деревообробного підприємства (м. Самбір Львівської області, вул. В. Чорновола, 36). Загальна характеристика цеху: загальна площа приміщень – 14 256 м<sup>2</sup>; висота цеху до ферм – 6 м; об'єм приміщень до ферм – 85 536 м<sup>3</sup>; довжина цеху з кроком колон 6 м – 192 м; ширина цеху – 72 м; пожежне навантаження – 200 кг/м<sup>2</sup>. Огороджувальні конструкції стін між відділеннями цегляні. Загалом у приміщенні є 6 евакуаційних виходів.

Для визначення критичного часу пожежі враховували значення допустимої концентрації токсичних речовин для життєдіяльності людини. Критичне значення густини кисню  $\rho_{O_2к} = 0,226$  кг/м<sup>3</sup>, максимально допустиме значення оптичної густини диму  $\mu \leq 1,2$  Нп/м. Критична для людини температура на проходах до евакуаційних виходів не повинна перевищувати 70° С. Розглядали пожежні ситуації: кругова пожежа в центрі цеху; кутова (180°) пожежа (пристінна) у відділенні лакування паралельно довгій осі цеху; кутова (180°) пожежа (пристінна) на складі готової продукції паралельно короткій осі цеху.

Результати моделювання пожежних ситуацій у закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств з використанням польового методу показали, що найбільша швидкість поширення пожежі в цеху спостерігається, якщо вона виникла в центральній частині приміщення за відсутності огороджувальних протипожежних конструкцій. Температура конвективної колонки осередку пожежі на висоті 6 м, тобто на нижній основі аркової залізобетонної безроскісної ферми, вже на другій хвилині досягає 420° С (рис. 2). Покрівля цеху, до якої доходить конвективна колонка, знаходиться вище від основи ферми на 3 м і на рис. 2 її не зображено.

Окрім того, розглядали вплив тривалості пожежі на зменшення густини кисню, на виділення токсичних речовин і збільшення оптичної густини диму. Цей вплив пожежі на вказані чинники зображено на рис. 3 і 4. На підставі отриманих залежностей визначали критичний час пожежі. Найменше його значення спостерігали у випадку виникнення пожежі в центрі цеху.

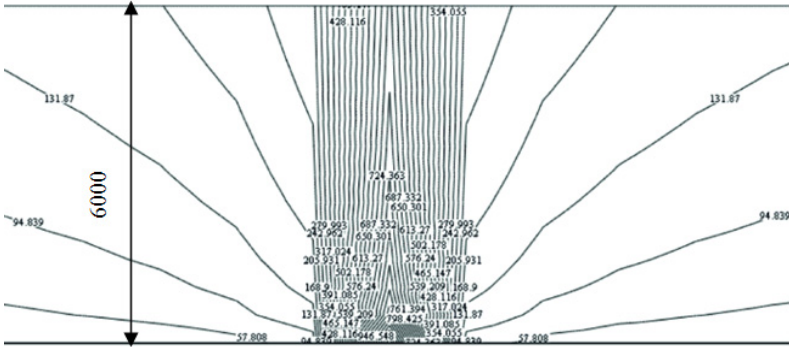


Рис. 2. Розміщення ізотерм у вертикальному перерізі цеху по висоті 6 м (6000 мм) на 2-й хв пожежі

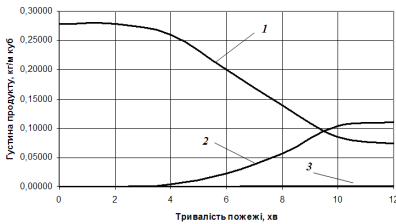


Рис. 3. Вплив тривалості вільного розвитку пожежі на: зменшення густини кисню – 1; виділення двоокису вуглецю – 2; оксиду вуглецю – 3

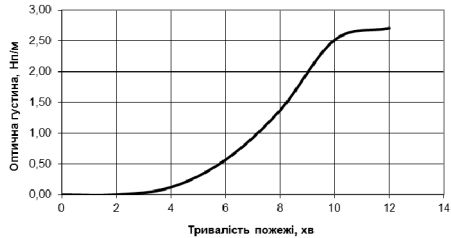


Рис. 4. Вплив тривалості вільного розвитку пожежі на значення оптичної густини диму

Результати досліджень тривалості поширення пожежі в закритому приміщенні деревообробного цеху загальною площею  $14\,256\text{ м}^2$  у різних пожежних ситуаціях показали, що залежно від місця виникнення пожежі вся площа цеху може бути охоплена пожежею в межах  $15\dots33,4$  хв.

Виходячи з аналізу отриманих результатів, для зменшення швидкості поширення пожежі було рекомендовано встановити в цеху пожежні відсіки. Для цього потрібно було визначити оптимальні розміри пожежних відсіків, які можна розмістити на виробничій площі цеху  $S$ . Під час розгляду компоувального плану цеху деревообробного підприємства можна відзначити, що вся площа цеху розділена на окремі виробничі ділянки. Багато виробничих ділянок підвищеної пожежної небезпеки відокремлені від загальної площі цеху протипожежними захисними стінами, тобто ці ділянки вже розміщені у своєрідних пожежних відсіках.

Тоді для розміщення пожежних відсіків залишається площа цеху, на якій знаходиться виробниче обладнання та відповідні виробничі ділянки. У цьому випадку вивільняється площа цеху  $S$  для розміщення пожежних відсіків, її можна визначити за залежністю

$$S = S_y - \sum_{i=1}^n S_i, \quad (3)$$

де  $S_y$  – загальна виробнича площа цеху,  $\text{м}^2$ ;  $S_i$  – площа  $i$ -ї ділянки підвищеної пожежної небезпеки,  $\text{м}^2$ ;  $n$  – загальна кількість в цеху ділянок підвищеної пожежної небезпеки, які ізольовані від загальної виробничої площі цеху.

Оптимальні розміри пожежних відсіків визначали, використовуючи оптимізаційну математичну модель:

функція мети

$$S_{\text{до.о}} \Rightarrow \max; \quad (4)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq S_{\text{н.о}} \leq b_1; \quad a_2 \leq \Pi_{\text{до}} \leq b_2; \quad S_{\text{до.о}} \Pi_{\text{до}} \geq \gamma S; \quad S_{\text{до.о}} \Pi_{\text{до}} \leq S; \quad p \geq [p], \quad (5)$$

де  $S_{\text{до.о}}$  – дійсне значення площі пожежного відсіку;  $S_{\text{н.о}}$  – нормативне значення площі пожежного відсіку;  $a_1$  – мінімальне значення нормативної площі пожежного відсіку;  $b_1$  – максимальне значення нормативної площі пожежного відсіку;  $a_2$  – мінімально можливе значення кількості пожежних відсіків  $\Pi_{\text{до}}$ ;  $b_2$  – максимально можливе значення  $\Pi_{\text{до}}$ ;  $\gamma$  – коефіцієнт, який враховує проходи і проїзди на виробничих ділянках;  $p$  – ймовірність потрапляння досліджуваної точки в область допустимих рішень;  $p = k/N$ ;  $k$  – кількість точок (циклів роботи комп'ютера), які потрапили в область допустимих рішень;  $N$  – загальна кількість циклів роботи комп'ютера під час розв'язку задачі;  $[p]$  – допустиме значення ймовірності потрапляння досліджуваної точки в область допустимих розв'язків.

Для розв'язування оптимізаційної моделі і визначення розмірів пожежних відсіків використовували метод Монте-Карло. Застосовували, зокрема, послідовність псевдовипадкових чисел  $\mu_i$  в інтервалі 0...1. Для перетворення псевдовипадкових чисел  $\mu_i$ , які рівномірно розподілені в інтервалі 0...1, до значень  $S_{\text{н.о}}$  та  $\Pi_{\text{до}}$  використовували залежності

$$S_{\text{н.о}} = a_1 + \mu_{1i}(b_1 - a_1); \quad \Pi_{\text{до}} = a_2 + \mu_{2i}(b_2 - a_2). \quad (6)$$

Для реалізації оптимізаційної моделі визначення оптимальних розмірів пожежних відсіків у цехах деревообробних підприємств було розроблено для ПЕОМ пакет прикладних програм на мові C# для роботи в середовищі Windows XP.

Впровадження пожежних відсіків дозволяє зменшити швидкість поширення пожежі у  $\xi$  разів:  $\xi = 1/\exp[-(\tau_{6,2}/T_B)]$ , де  $\tau_{6,2}$  – тривалість вільного горіння, хв;  $T_B$  – вогнестійкість огорожувальних конструкцій пожежного відсіку, хв.

Розроблена комп'ютерна програма дозволяє автоматизувати синтез оптимальних розмірів пожежних відсіків та їх кількість для цехів деревообробних підприємств.

У третьому розділі «Моделювання пожежних ситуацій розвитку та поширення пожежі на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств» розглянуто основні конструктивні особливості відкритих складів лісоматеріалів, моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі на складах пиломатеріалів і круглих лісоматеріалів, а також вплив небезпечних чинників пожежі на відкритих складах лісоматеріалів на екологію навколишнього середовища.

Аналіз праць з визначення швидкості поширення фронту пожежі на

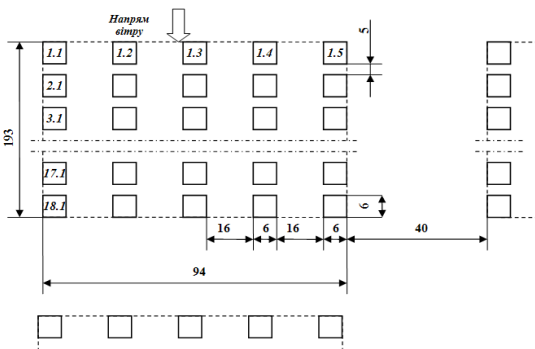


Рис. 5. План відкритого складу пиломатеріалів

відкритих складах круглих лісоматеріалів штабельного зберігання показує, що наразі немає вдосконаленої методології її визначення. Тому ставиться завдання, вирішення якого деякою мірою дозволить ліквідувати цю прогалину, а отримані результати дадуть змогу розробити додаткові заходи протипожежної безпеки на цих складах. За основу під час розгляду

конструктивних особливостей відкритих складів лісоматеріалів було взято відповідні рекомендації зі зберігання та складування деревини. На рис. 5 зображено план розташування одного кварталу складу пиломатеріалів штабельного зберігання.

Основні параметри одного кварталу складу пиломатеріалів: штабелі розміром  $b \times l \times h = 6 \times 6 \times 5$  м; ширина поздовжніх розривів між штабелями  $b_{нов} = 16$  м; ширина поперечних розривів між штабелями  $b_{пос} = 5$  м; загальна кількість поздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною 193 м; загальна площа кварталу  $18\,142\text{ м}^2 \approx 1,8$  га; протипожежні розриви між кварталами при висоті штабелів 5 м дорівнюють 40 м. Швидкість поширення фронту

полум'я  $V_{II}$  по одному штабелю визначали за залежністю, яку отримав І. О. Іванов на підставі результатів експериментальних досліджень П. П. Девлішева:

$$V_{II} = \frac{7,5\psi_n}{K_p \omega (Kh)^{0,33} (KL_\phi)^{0,2}} \left[ 1 + \frac{0,016V_g K_p \omega (Kh)^{0,33} (KL_\phi)^{0,2}}{7,5\psi_n} \right], \text{ м/с} \quad (7)$$

де  $\psi_n$  – питома швидкість вигорання, кг/м<sup>2</sup>с;  $K_p$  – щільність укладання пиломатеріалів;  $K_p = V_d/V_{ш}$ ;  $V_d$  – об'єм деревини в штабелі, м<sup>3</sup>;  $V_{ш}$  – об'єм штабеля пиломатеріалів ( $b \times l \times h$ ), м<sup>3</sup>;  $\omega$  – вологість деревини, %;  $K$  – величина поверхні деревини в одиниці об'єму штабеля, м<sup>2</sup>;  $K = (1\text{ м}^2) 2z K_p$ , м<sup>2</sup>;  $z$  – кількість рядів пиломатеріалу на висоті 1 м;  $h$  – висота штабеля, м;  $V_g$  – швидкість вітру, м/с;  $L_\phi$  – довжина фронту полум'я, м.

Час  $\tau_{ш}$ , за який верхня площа штабеля буде охоплена полум'ям, визначали за залежністю  $\tau_{ш} = l/V_{II}$ , с. Густина теплового потоку  $q_p$  результуючого випромінювання від штабеля, який горить, визначали за залежністю Стефана – Больцмана:

$$q_p = \frac{\sigma(T_\phi^4 - T_d^4)}{\frac{1}{A_\phi} + \frac{1}{A_d} - 1 + \frac{3\alpha x}{4}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (8)$$

де  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – стала Стефана – Больцмана;  $T_\phi$  – температура факела, К;  $T_d$  – температура займання деревини, К (згідно з довідниковими даними, температура займання деревини сосни вологістю 8-9% дорівнює 528 К, ялини – 487 К, дуба – 511 К);  $A_\phi = 0,9$  – ступінь чорноти факела полум'я;  $A_d = 0,6$  – ступінь чорноти деревини штабеля;  $\bar{\alpha}$  – осереднений за спектром коефіцієнт поглинання середовища ( $\bar{\alpha} = 0,45/l_c$ , де  $l_c$  – найбільша товщина шару середовища між сусідніми штабелями, м);  $x$  – дійсна відстань між штабелями, м.

Температуру на боковій поверхні штабеля, сусіднього з тим, що горить, визначали за залежністю

$$T_{ш} = \frac{q_p S_g}{\alpha_{ш} S_{ш}} + T_0, \text{ К} \quad (9)$$

де  $S_g$  – площа випромінювання теплового потоку, м<sup>2</sup>;  $\alpha_{ш}$  – коефіцієнт тепловіддачі для бічної площини штабеля, кВт/(м<sup>2</sup>К);  $S_{ш}$  – площа бокової площини штабеля в поперечних або поздовжніх розривах між штабелями, м<sup>2</sup>;  $T_0$  – початкова температура на боковій площині штабеля, К.

Визначивши  $T_{ш}$ , його значення порівнюють з температурою займання деревини  $T_d$ . Якщо  $T_{ш} \geq T_d$  сусіднього штабеля, то пожежа



переходить на цей штабель. На підставі результатів порівняння температур поставлену задачу розв'язуватимемо у два етапи: 1) визначення швидкості поширення фронту пожежі  $V_\phi$  на відкритих складах пиломатеріалів на основі побудови графових моделей; 2) визначення впливу швидкості вітру  $V_v$  на швидкість поширення фронту пожежі  $V_\phi$  на відкритих складах пиломатеріалів. Вплив часу вільного горіння на площу пожежі можна подати каскадним графом поширення пожежі (рис. 6).

Вершини графа (рис. 6) зображають штабелі пиломатеріалів, а ребра – час  $\tau_{II}$  охоплення полум'ям верхньої площини штабеля і переходу пожежі на сусідні штабелі, наприклад, від штабеля 1.3, на якому виникла пожежа, до відповідних груп штабелів. Цей час дорівнює  $\tau_{II} = \tau_{ш} + \tau_s$ , хв. Складові  $\tau_{II}$  визначали так:  $\tau_{ш} = l/V_{II}$ ;  $\tau_s = \tau_{ш}[(1/k) - 1]$ ,  $k$  – коефіцієнт, який враховує час затримки спалаху.

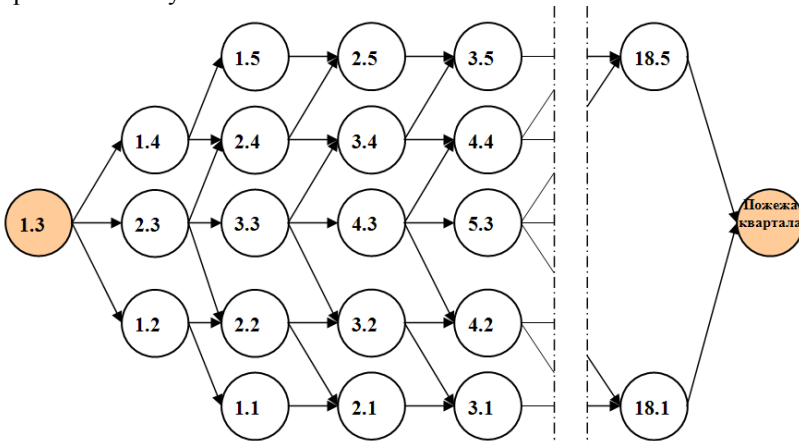


Рис. 6. Каскадний граф розповсюдження пожежі на кварталі складу пиломатеріалів при швидкості вітру  $V_v = 4$  м/с

Результати аналізу каскадного графа розповсюдження пожежі показують, що на ньому можна виділити  $k_{ш} = 20$  груп штабелів, кожна з яких одночасно поширює пожежу вздовж кварталу складу, а саме: 1) пожежа виникла на штабелі 1.3 (перша група); 2) від штабеля 1.3 пожежа передається на штабелі 1.2, 2.3 і 1.4 (друга група); 3) від штабелів 1.2, 2.3 і 1.4 – на штабелі 1.1, 2.2, 3.3, 2.4 і 1.5 (третья група)... 18) від штабелів 16.1, 17.2, 18.3, 17.4 і 16.5 – на штабелі 17.1, 18.2, 18.4, і 17.5 (вісімнадцята група); 19) від штабелів 17.1, 18.2, 18.4, і 17.5 – на штабелі 18.1 і 18.5 (дев'ятнадцята група); 20) пожежею охоплені штабелі 18.1 і 18.5 (остання двадцята група, яка показує, що в цьому випадку пожежею охоплено весь

квартал складу). На підставі цього можна визначити швидкість поширення фронту пожежі по кварталу складу пиломатеріалів за залежністю

$$V_{\phi} = \frac{S_{в.п.ш} n_{ш}}{b n_{ш.пор} \tau_{П} k_{ш}}, \text{ м/хв.} \quad (10)$$

де  $S_{в.п.ш}$  – площа верхньої поверхні одного штабеля,  $\text{м}^2$ ;  $n_{ш}$  – загальна кількість штабелів в  $k_{ш}$  групах кварталу складу, які охоплені пожежею;  $n_{ш.пор}$  – кількість штабелів у поперечних рядах  $k_{ш}$  груп кварталу складу, які охоплені пожежею.

На підставі розгляду каскадного графа розповсюдження пожежі на кварталі складу пиломатеріалів (рис. 6) та з використанням залежності (11) було виконано розрахунки, результати яких зображено на рис. 7.

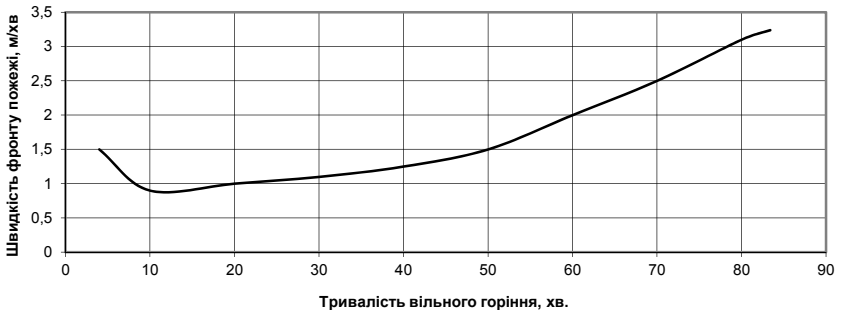


Рис. 7. Залежність швидкості фронту поширення пожежі від тривалості вільного горіння (пожежа розпочалася на штабелі 1.3 при швидкості вітру  $V_e = 4$  м/с)

На підставі результатів аналізу графічної залежності (рис. 7) можна зазначити, що на початку виникнення пожежі довжина її фронту дорівнювала тільки ширині штабеля  $b = 6$  м зі швидкістю фронту пожежі  $V_{\phi} = 1,5$  м/хв. Упродовж 10 хв. фронт пожежі розширюється, а швидкість зменшується. Після досягнення довжини фронту пожежі ширини кварталу швидкість фронту пожежі починає зростати і наприкінці вільного горіння, тобто до покриття пожежею всього кварталу, вона сягає  $V_{\phi} = 3,24$  м/хв. при швидкості вітру  $V_e = 4$  м/с. Для визначення впливу швидкості вітру  $V_e$  на швидкість поширення фронту пожежі  $V_{\phi}$  на відкритих складах пиломатеріалів використали отриману залежність  $V_{\phi} = K_e V_e$ , де  $K_e = 0,2365 V_e + 0,1082$ .

Аналогічні дослідження виконано для визначення швидкості фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів. Встановлено, що

швидкість фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів за однакових умов приблизно у 3...3,5 разу більша від швидкості фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів. На швидкість фронту пожежі великою мірою впливає швидкість і напрям дії вітру. Результати аналізу графових моделей показали, що зі збільшенням швидкості вітру до 10 м/с, якщо порівнювати з безвітряною погодою, швидкість фронту пожежі: 1) при бічному вітрі  $\alpha_s = 45^\circ$  збільшується на 21,4%; 2) при попутному вітрі  $\alpha_s = 90^\circ$  збільшується на 26,6%; 3) при зустрічному вітрі  $\alpha_s = 270^\circ$  зменшується приблизно у 3,5 разу. Також встановлено, що тривалість вільного поширення пожежі залежить від місця її виникнення на кварталі складу. Найбільша тривалість вільного поширення пожежі спостерігалася у разі її виникнення на зовнішньому куті кварталу, а найменша – у центрі кварталу. Різниця в цьому випадку сягає до 2 разів.

Пожежі на відкритих складах лісоматеріалів негативно впливають на екологічну безпеку, адже в зовнішнє середовище відбуваються викиди небезпечних речовин. Зважаючи на це, було розглянуто вплив небезпечних чинників таких пожеж на екологію навколишнього середовища. Встановлено, що екологічний ризик при ймовірності виникнення пожежі на відкритих шахтних складах лісоматеріалів залежить передусім від пожежного ризику. Зменшення пожежного ризику приводить до зменшення екологічного ризику. Результати досліджень показали, що на екологічну безпеку великою мірою впливає швидкість вітру. Збільшення швидкості вітру при пожежі на відкритих складах лісоматеріалів удвічі, наприклад, з 2 м/с до 4 м/с, збільшує площу розповсюдження продуктів горіння приблизно у два рази, і в багатьох випадках навіть унеможливорює перебування людини на цій території.

**У четвертому розділі «Оптимізація сил і засобів ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах»** розглянуто вибір та обґрунтування критерію оптимізації, статистичне моделювання надійності пожежної техніки для локалізації й гасіння пожежі, оптимізацію сил і засобів ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах з урахуванням надійності пожежної техніки, а також досліджено сили і засоби ліквідації пожежі у залежності від основних чинників пожежі та надійності системи пожежогасіння.

Для розроблення оперативних планів і карток пожежогасіння для кожного об'єкта потрібно на підставі основних положень теорії прийняття рішень ухвалити найбільш вірогідне рішення для ліквідації пожежі з його оцінкою за відповідним варіантом та умовами, які можуть характеризуватися відповідними економічними показниками. Такими показниками можуть бути, наприклад, витрати у вигляді прямих збитків об'єкта від пожежі  $B_o$  та витрати пожежно-рятувальних частин  $B_n$  на ліквідацію пожежі за прийнятим рішенням в певній ситуації її розвитку.

У пожежній практиці розглядають такі основні критерії для оптимізації тривалості часу ліквідації пожежі: 1) мінімаксний критерій (ММ) на основі песимістичної позиції; 2) критерій Байєса – Лапласа; 3) критерій Севіджа; 4) критерій Гурвіца; 5) критерій Ходжа – Лемана; 6) критерій Гермейера; 7) критерій добутку; 8) критерій нейтралітету; 9) оптимістичний критерій; 10) різницевий критерій. Використання цих критеріїв для прийняття рішень не завжди дає оптимальні результати, але на їх основі можна отримати «достатньо» раціональні рішення. Тому постає завдання розробити метод визначення досконалішого за своїм значенням критерію прийняття рішення для оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах.

Після визначення прогнозованої тривалості вільного розвитку пожежі та зайнятості пожежно-рятувальних підрозділів для її ліквідації було поставлено такі задачі для визначення критерію ухвалення рішення при оптимізації процесу локалізації та гасіння пожежі на деревообробних підприємствах: 1) визначити збитки об'єкта від тривалості вільного розвитку пожежі та її локалізації; 2) визначити втрати пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі; 3) встановити оптимальне значення критерію прийняття рішення для оптимізації процесу локалізації і гасіння пожежі на деревообробних підприємствах.

Для визначення збитків об'єкта від пожежі і витрат пожежно-рятувальних підрозділів використовуємо залежності:

$$B_o = C_o (S_{П1} + S_{П2} + S_{П3}); \quad (11)$$

$$B_n = C_n (\tau_{o,o} + \tau_{з,c} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз} + \tau_{лок} + \tau_2 + \tau_{лік}), \quad (12)$$

де  $C_o$  – середня вартість одного квадратного метра площі об'єкта, яка знищена пожежею, грн/м<sup>2</sup>;  $S_{П1}$  – площа пожежі за перші 10 хв. вільного розвитку пожежі, м<sup>2</sup>;  $S_{П2}$  – площа пожежі за час вільного розвитку пожежі без урахування перших 10 хв., м<sup>2</sup>;  $S_{П3}$  – площа пожежі за час локалізації пожежі, м<sup>2</sup>;  $C_n$  – вартість однієї хвилини роботи пожежно-рятувальних підрозділів в процесі ліквідації пожежі, грн/хв.;  $\tau_{o,o}$  – час на отримання й опрацювання сповіщення про пожежу, хв.;  $\tau_{з,c}$  – час на залучення сил та засобів гарнізону для гасіння пожежі, хв.;  $\tau_{зб}$  – час збору особового складу, хв.;  $\tau_{сл}$  – час слідування на пожежу, хв.;  $\tau_{роз}$  – час оперативного розгортання, хв.;  $\tau_{лок}$  – час локалізації пожежі, хв.;  $\tau_2$  – час гасіння пожежі, хв.;  $\tau_{лік}$  – час на закінчення ліквідації пожежі (остаточне гасіння), хв.

Для визначення оптимального часу локалізації пожежі було розкрито значення площ пожежі,  $\tau_{лок}$ ,  $\tau_2$  і  $\tau_{лік}$ . На підставі цих значень отримано рівняння  $y = B_o + B_n$  виду

$$y = C_o V_L^2 \alpha \tau_{в.з}^2 - 20 C_o V_L^2 \alpha \tau_{в.з} + 0, 25 C_o V_L^2 \alpha \tau_{лок}^2 + 125 C_o V_L^2 \alpha + C_n \tau_{о.о} + \\ + C_n \tau_{з.с} + C_n \tau_{з.б} + C_n \tau_{с.л} + C_n \tau_{роз} + + 1, 25 C_n \left( \frac{S_{II}}{S_{лок}} - 1 \right) \tau_{лок} + 0, 25 C_n \tau_{лок}, \quad (13)$$

де  $V_L$  – лінійна швидкість поширення пожежі, м/хв.;  $S_{II}$ ,  $S_{лок}$  – відповідно площа пожежі і площа локалізації, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі.

Похідна по часу  $\tau$  від функції (13), яка була прирівняна до нуля, має вигляд

$$\frac{dy}{d\tau} = C_o V_L^2 \alpha (2\tau_{в.з} - 20) + 0, 5 C_o V_L^2 \alpha \tau_{лок} + 5, 25 C_n + 1, 25 C_n \left( \frac{S_{II}}{S_{лок}} - 1 \right) = 0. \quad (14)$$

На підставі залежності (14) було визначено оптимальне значення часу локалізації пожежі

$$\tau_{лок.оп} = 8 - \frac{C_n [4 + 1, 25 \left( \frac{S_{II}}{S_{лок}} \right)]}{2, 5 C_o V_L^2 \alpha}. \quad (15)$$

Забезпечення оптимального часу локалізації пожежі дозволило отримати значення критерію прийняття рішення для оптимізації процесу локалізації і гасіння пожежі на деревообробних підприємствах виду  $B_o + B_n \Rightarrow B_{\min}$ .

Найбільш впливовим чинником, від якого залежить процес ліквідації пожежі, є надійність пожежної техніки. Систему пожежогасіння було поділено на три блоки надійності. До першого блоку були віднесені системи подачі води до автоцистерни, до другого – автомобіль гасіння типу АЦ, до третього – рукав пожежний напірний від насоса пожежного відцентрового до триходового розгалуження рукавного, три паралельні рукави пожежних напірних, три паралельно працюючі пожежні стволи ручні, з яких один ствол  $A$  і два стволи  $B$ .

Для визначення основних показників надійності всіх блоків пожежної техніки використовували метод статистичного моделювання, завдяки якому отримали значення ймовірності безвідмовної роботи та коефіцієнт готовності всіх складових конструктивних елементів усіх трьох блоків. Одержані значення показників надійності були використані для визначення оптимальної кількості пожежної техніки для ліквідації пожеж.

Перед переходом до розроблення оптимізаційної математичної моделі для визначення сил і засобів пожежогасіння у приміщеннях цехів деревообробних підприємств було розглянуто вплив тривалості вільного горіння на співвідношення  $K = S_{II}/S_{лок}$  (рис. 8).

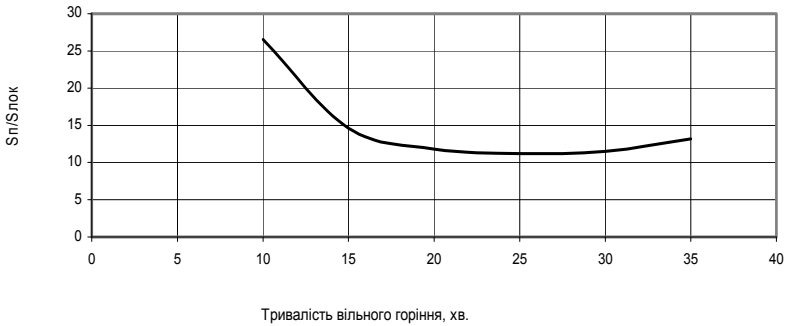


Рис. 8. Вплив тривалості вільного горіння  $\tau_{в.з}$  на співвідношення  $\frac{S_{п}}{S_{лок}}$

Отримана графічна залежність відповідає поліному четвертого степеня:

$$K = 0,0002\tau_{в.з}^4 - 0,0253\tau_{в.з}^3 + 0,9768\tau_{в.з}^2 - 16,75\tau_{в.з} + 119,18. \quad (16)$$

Для визначення оптимального значення тривалості вільного горіння було взято похідну від залежності (16) по  $\tau_{в.з}$  і прирівняно її значення до нуля:

$$\frac{dK}{d\tau_{в.з}} = 0,0008\tau_{в.з}^3 - 0,0759\tau_{в.з}^2 + 1,9536\tau_{в.з} - 16,75 = 0. \quad (17)$$

На підставі залежності (17) було визначено оптимальне значення тривалості часу вільного горіння  $\tau_{в.з.опт}$  в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств для різних форм пожежі та швидкостей її поширення. Результати розрахунків показали, що оптимальне значення тривалості вільного горіння знаходиться в межах  $\tau_{в.з.опт} = 19 \dots 25$  хв., яке було прийнято для визначення площі пожежі й оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння.

Для оптимізації кількості сил і засобів пожежогасіння у приміщеннях цехів деревообробних підприємств було розроблено оптимізаційну математичну модель, яка має вигляд:

функція мети

$$\tau_n \Rightarrow \min; \quad (18)$$

за обмеженнями

$$\begin{aligned} a_1 \leq N_{B_n}^r \leq b_1; \quad a_2 \leq N_{B_n}^3 \leq b_2; \quad a_3 \leq N_{A_n} \leq b_3; \\ a_4 \leq \tau_{в.з} \leq b_4; \quad \tau_{лок} \leq \tau_{лок.оп}; \quad p \geq [p], \end{aligned} \quad (19)$$

де  $\tau_i$  – тривалість ліквідації пожежі;  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – мінімальні значення обмежень;  $b_1, b_2, b_3, b_4$  – максимальні значення обмежень;  $N_{B_n}^I, N_{B_n}^3, N_{A_n}$  – кількість пожежних стовлів Б і А на ліквідацію пожежі з урахуванням надійності системи пожежогасіння;  $p$  – ймовірність потрапляння досліджуваної  $i$ -ї точки в область допустимих розв'язків;  $[p]$  – допустиме значення ймовірності.

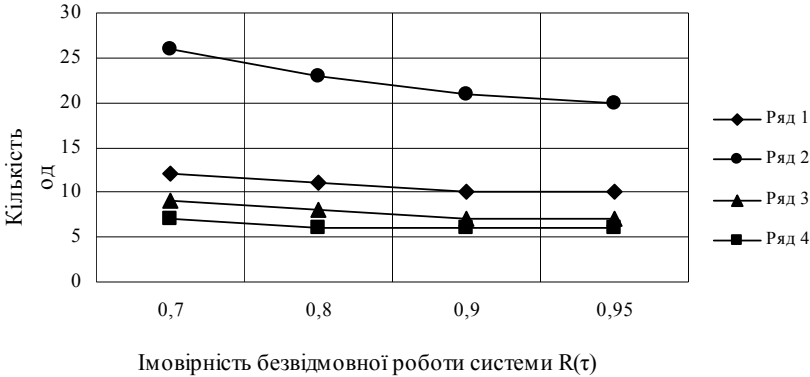


Рис. 9. Вплив надійності системи пожежогасіння на кількість пожежно-рятувальних відділень та приладів для гасіння пожежі: ряд 1 – пожежно-рятувальні відділення; ряд 2 – ручні стовли Б для гасіння; ряд 3 – ручні стовли Б для захисту; ряд 4 – ручні стовли А для гасіння.

Для розв'язування оптимізаційної моделі використовували метод Монте-Карло. На першому етапі було розроблено блок-схему алгоритму розв'язку моделі, відтак написано програму на мові програмування C#. Пакет прикладних програм дав змогу провести дослідження з визначення впливу основних чинників системи ліквідації пожежі на оптимізацію сил і засобів пожежогасіння. Наприклад, розглянемо вплив ймовірності безвідмовної роботи системи  $R_c(\tau)$  пожежогасіння на кількість пожежно-рятувальних відділень та приладів пожежогасіння (рис. 9).

Результати аналізу впливу ймовірності безвідмовної роботи на кількість пожежно-рятувальних відділень та приладів для гасіння пожежі показали, що зі зміною ймовірності безвідмовної роботи всієї системи пожежогасіння з 0,7 до 0,95 кількість відділень зменшується в 1,2 разу, а кількість стовлів Б на гасіння пожежі – в 1,3 разу. Відповідно зменшується кількість стовлів А на гасіння і стовлів Б на захист. Тож  $R_c(\tau)$  необхідно враховувати для кожного випадку ліквідації пожежі. Аналогічно до математичного моделювання для оптимізації кількості сил і засобів пожежогасіння в приміщеннях цехів було розроблено оптимізаційну математичну модель визначення сил і засобів пожежогасіння на відкритих складах лісоматеріалів.

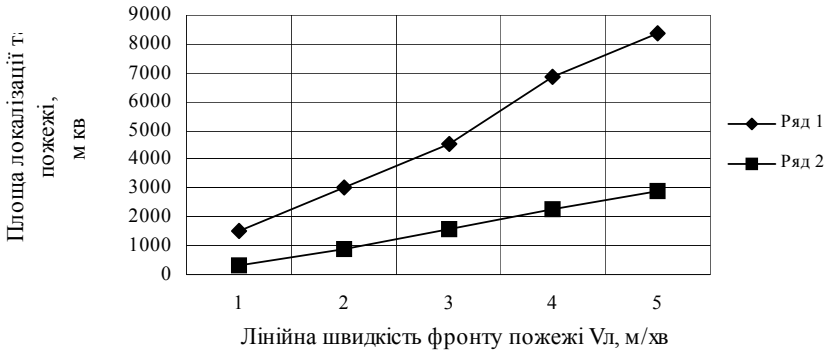


Рис. 10. Вплив лінійної швидкості фронту пожежі при попутно-боковому вітрі  $V_e = 4$  м/с на: площу локалізації – ряд 1; площу пожежі – ряд 2

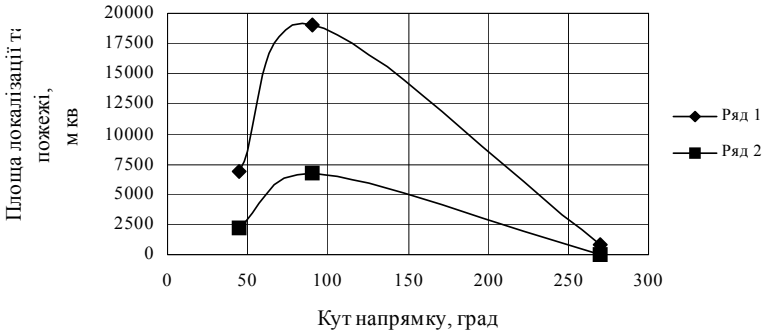


Рис. 11. Вплив напрямку вітру на площу локалізації (ряд 1) і площу пожежі (ряд 2) при  $V_d = 3,51$  м/хв і  $V_e = 4$  м/с

Було досліджено і процес ліквідації пожежі на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів з використанням розробленої програми. Першою особливістю процесу ліквідації пожежі є те, що площа локалізації значно більша від площі пожежі (рис. 10). Виявлено, що під час ліквідації пожежі на складах штабельного зберігання лісоматеріалів площа локалізації більша за площу пожежі приблизно у 3,4 разу. Це пояснюється тим, що площа локалізації розміщується по периметру штабелів, які охоплені пожежею, а площа пожежі визначається як проекція площі горіння на площу основи розміщення штабелів.

Встановлено також, що зі збільшенням бокового попутного вітру ( $\alpha_e = 45^\circ$ ) у 4 рази площа локалізації за той же час збільшується приблизно в 2,1 разу, а площа пожежі – у 2,15 разу. Такі результати можна пояснити збільшенням лінійної швидкості фронту пожежі.



Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що найбільша площа локалізації і пожежі відповідає попутному напрямку вітру ( $\alpha_e = 90^\circ$ ) (рис. 11), а найменші площі відповідають зустрічному напрямку вітру ( $\alpha_e = 270^\circ$ ). Наприклад, площа локалізації за один і той самий час дослідження при зустрічному напрямку вітру, якщо порівняти з попутним, зменшується майже у 25 разів.

Отримані результати досліджень розроблених математичних моделей для визначення сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожеж порівнювались і аналізувались, використовуючи результати ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах України. Використання цих програм дає змогу оперативно визначити кількість сил і засобів пожежогасіння.

**У п'ятому розділі «Теоретичні положення оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій для деревообробних підприємств»** розглянуто вогнестійкість залізобетонних кроквяних сегментних, трапецієподібних та аркових ферм, які в більшості випадків використовують для виготовлення скатних покрівель деревообробних цехів. Клас вогнестійкості кроквяних ферм скатних покрівель залізобетонної конструкції, які найчастіше використовують у приміщеннях цехів деревообробних підприємств, має бути головною підставою для пожежно-рятувальних підрозділів при визначенні максимального часу ліквідації пожежі.

Щоби визначити межу вогнестійкості, за основу брали аналіз планувальних рішень приміщення, його архітектурні особливості, пожежне навантаження, а також враховували сценарій розвитку реальної пожежі. Згинальні моменти, зокрема й максимальний в небезпечному перерізі арки, визначали з врахуванням основних положень теорії опору матеріалів та методу сил. Розглядали також вплив температури і відповідно релаксації на зменшення допустимих напружень для арматури і бетону, що необхідно знати для виявлення можливості подальшої експлуатації приміщення. Було встановлено, що вогнестійкість кроквяних ферм скатних покрівель залізобетонної конструкції деревообробних цехів з шириною прольоту 18 000 мм за ознакою втрати несучої здатності належить до класу вогнестійкості **R90**.

Результати виконаних досліджень показали, що розроблена методологія для встановлення класу вогнестійкості кроквяних ферм для скатних покрівель за ознакою втрати несучої здатності дозволяє, за умови якісного виготовлення ферми, встановити клас вогнестійкості без виконання вогневих випробувань. Загальна відносна похибка теоретичних розрахунків відносно результатів експериментальних досліджень, як засвідчили численні результати досліджень, не перевищує 5...8%.

**У шостому розділі «Теоретичні основи тактики локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах»** розглянуто моделювання тактики локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах. Під час розроблення математичної моделі вибору

оптимальних тактичних прийомів локалізації і гасіння пожежі в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств враховували такі чинники: 1) тривалість локалізації і гасіння пожежі; 2) матеріальні втрати від пожежі; 3) тривалість вільного розвитку пожежі; 4) форму площі пожежі та місце її виникнення у приміщенні; 5) наявність пожежних відсіків у приміщенні; 6) безпечний рівень теплового потоку від фронту пожежі; 7) мінімально необхідну кількість пожежних стволів для локалізації і гасіння пожежі; 8) швидкість вітру та його вплив на надлишковий тиск або розрядження в осередку закритого приміщення; 9) тактико-технічні характеристики пожежних стволів, які використовують для локалізації і гасіння пожежі; 10) правила охорони праці під час локалізації і гасіння пожежі.

Врахувавши всі чинники, пов'язані з математичною постановкою задачі оптимізації, було розроблено оптимізаційну математичну модель тактики локалізації і гасіння пожежі в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств:

Функція мети

$$\tau_{лок} + \tau_2 \Rightarrow \min; \quad (20)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq N_B^I \leq b_1; a_2 \leq N_B^3 \leq b_2; a_3 \leq N_A \leq b_3; \\ a_4 \leq \tau_{\omega,2} \leq b_4; a_5 \leq l_q \leq b_5; p \geq [p], \quad (21)$$

де  $\tau_{лок}$  – час локалізації пожежі, хв.;  $\tau_2$  – час гасіння пожежі, хв.;  $a_1, a_2 \dots a_5$  – мінімальні значення обмежень;  $b_1, b_2 \dots b_5$  – максимальні значення обмежень;  $l_q$  – відстань пожежника зі стволом від фронту пожежі, м;  $p$  – ймовірність потрапляння досліджуваної  $i$ -ї точки в область допустимих розв'язків ( $p=k/N$ , де  $k$  – кількість циклів роботи програми, при яких досліджувані точки потрапили в область допустимих розв'язків;  $N$  – загальна кількість циклів роботи програми);  $[p]$  – допустиме значення ймовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення.

Для розв'язування оптимізаційної моделі використовували метод Монте-Карло. Перед написанням програми було розроблено блок-схему алгоритму розв'язку моделі, яка передбачала вибір тактичного варіанта локалізації і гасіння пожежі залежно від місця її виникнення  $I(x; y)$ , де  $I$  – форма площі пожежі;  $x, y$  – координати пожежі (рис. 12).

Завершивши роботу програми, на друк видають такі дані: площа пожежі  $S_{II}$  на час початку локалізації; тривалість слідування до місця виклику  $\tau_{св}$ ; лінійна швидкість поширення пожежі  $V_p$ ; тривалість локалізації  $\tau_{лок}$  і гасіння  $\tau_2$  пожежі; кількість і типи пожежних стволів  $N_B^I, N_B^3, N_A$ ; відстань пожежника зі стволом від фронту пожежі  $l_q$ ; визначена ймовірність  $p$ ; тип апарату для захисту органів дихання та зору; тип термозахисного

одягу; тривалість роботи в осередку пожежі; тактичний варіант локалізації і гасіння пожежі; місця та ділянки для захисту об'єкта й обладнання від полум'я пожежі і температури. Для реалізації оптимізаційної моделі було розроблено для ПЕОМ пакет прикладних програм на мові С# для роботи в середовищі Windows XP.

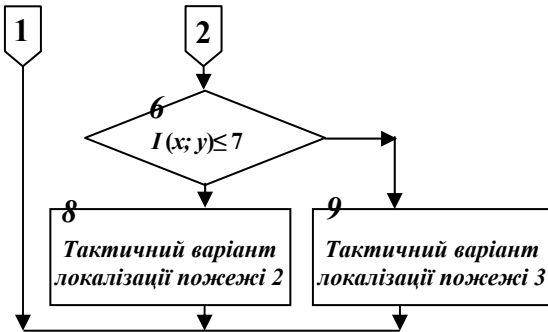


Рис. 12. Фрагмент блок-схеми алгоритму вибору тактичного варіанта локалізації пожежі

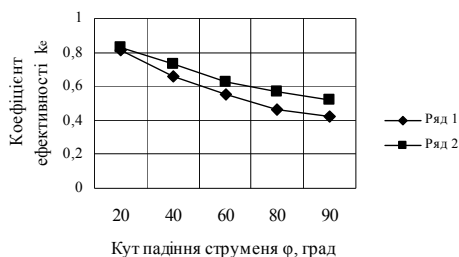
Аналогічний підхід було виконано під час розробки оптимізаційної математичної моделі для відкритих складів лісоматеріалів. Для її реалізації для комп'ютера створили пакет прикладних програм на мові С# для роботи в середовищі Windows XP. При цьому для процесу локалізації і гасіння враховували ефективність використання води для захисту від нагрівання

штабелів, які не горять і знаходяться перед фронтом пожежі. Щоб визначити цю ефективність, проводили експериментальні дослідження. Визначили довжину шляху водної смуги при її опусканні з найвищої точки штабеля  $h$  до початку кипіння, а також товщину водної смуги  $\delta$ . У процесі охолодження вода, спрямована зі ствола на бокові поверхні штабеля, частково входить всередину штабеля, частково відбивається від поверхні, а залишок стікає по боковій поверхні штабеля й охолоджує її. Потрібно було визначити оптимальний кут напрямку подачі струменя води з пожежного ствола на бокову поверхню штабеля, який забезпечив би найбільшу ефективність використання води для його охолодження. Воду на поверхню штабеля подавали за допомогою ручного ствола Б з насадкою 13 мм при напорі 0,4 МПа з відстані  $l_c = 5$  м. Для збирання води, яка стікала з бокової поверхні штабеля й охолоджувала її, використовували спеціальну ємність, ширина якої забезпечувала тільки прийом води з поверхні штабеля, а довжина забезпечувала утримання об'єму води тільки на охолодження поверхні штабеля протягом часу  $\tau = 20$  с до 70 л.

Досліджували вплив кута  $\varphi$  подачі суцільного струменя на коефіцієнт ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів  $k_e = V_e/V_c$  (де  $V_e$  – ефективний об'єм води для охолодження;  $V_c$  – об'єм води, який вийшов із пожежного ствола). Далі наведемо результати досліджень (рис. 13б) при охолодженні бокових поверхонь штабеля пиломатеріалів, які складені з утворенням зазорів між шарами деревини (рис. 13а).



а



б

Рис. 13. Вплив кута  $\varphi$  подачі суцільного струменя на коефіцієнт  $k_e$  при охолодженні бокових поверхонь штабеля пиломатеріалів, які складені з утворенням зазорів між шарами деревини – а і результати досліджень – б: ряд 1 – з торця штабеля; ряд 2 – уздовж довгої осі пиломатеріалу

Результати досліджень показали, що для забезпечення якісного охолодження поверхонь штабелів, які розміщені з боку фронту пожежі, необхідно подавати суцільний струмінь води під кутом не більше як  $20^\circ$  до поверхні штабеля у вигляді коливних маятникових рухів. При цьому охолодження потрібно починати з верхньої частини штабеля і по всій довжині його сторони, а також враховувати, що кипіння стікаючої водної смуги починається на довжині її шляху в межах  $0,5 \dots 0,8$  м.

Отримані в підсумку теоретичних й експериментальних досліджень результати порівнювали з наявними, аналізуючи й оцінюючи оптимальні тактичні методи локалізації і гасіння пожежі. Результати аналізу засвідчили, що розроблені системи дають змогу завдяки оперативному визначенню тактичних дій зменшити площу пожежі до перших стволів в межах до 19,9%.

**У сьомому розділі «Експериментальне дослідження тактичних методів з локалізації і ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах»** наведено результати експериментальних досліджень для визначення часу оперативного розгортання сил і засобів пожежогасіння та часу локалізації і гасіння пожежі на відкритих складах пиломатеріалів штабельного зберігання.

Для дослідження часових характеристик діяльності пожежно-рятувальних служб під час пожежі на відкритих складах лісоматеріалів, а саме часу оперативного розгортання і тривалості ліквідації пожежі, використовували таке пожежно-технічне устаткування, технічне спорядження та відповідні вимірювальні прилади: 1) автоцистерни типу АЦ40(130)63Б ДСТУ 3286-95; 2) ручні пожежні стволи типу А ДСТУ 2112-92; 3) ручні пожежні стволи типу Б ДСТУ 2112-92; 4) пожежні рукави d77 довжиною скатки 20 м типу К ДСТУ 3810-98; 5) розгалуження пожежне

ДСТУ 2111-92; 6) колонка пожежна h-0,5 для відкриття (закриття) підземних гідрантів ДСТУ 2801-94 (висота колонки Н 750 мм, маса 85 кг); 7) секундомір годинникового типу С ОС пр-2Б-2-000 (на 60 хв.); 8) телефонні апарати типу ТАН-70-4, які використовували для забезпечення якісного зв'язку в пожежно-рятувальних відділеннях; 9) інструмент для визначення розмірів – рулетка 50 м ГОСТ 427-75. Під час дослідження використовували дробовий факторний експеримент.

Зокрема, розглядали вплив таких факторів на тривалість оперативного розгортання сил і засобів пожежогасіння: кількість відділень  $N_e$ , яка бере участь у ліквідації пожежі; кількість пожежних машин (автоцистерн)  $N_{ац.е}$ , яку необхідно поставити на пожежні гідранти; кількість пожежних машин (автоцистерн) – кількість  $N_{ац.б}$ , яку необхідно поставити на пожежне водоймище; кількість скаток пожежних рукавів  $N_p$ ; кількість ручних пожежних стволів типу А  $N_A$ ; кількість ручних пожежних стволів типу Б  $N_B$ .

Для проведення комплексу експериментів з оперативного розгортання було виконано дослідів  $N_{роз}=2^{6-3}=8$  при кількості повторень  $r = 2$ . Результати кодування факторів, які досліджувалися, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

### Кодування та рівні зміни факторів

Рівні факторів	$N_e$		$N_{ац.е}$		$N_{ац.б}$		$N_p$		$N_A$		$N_B$	
	$\tilde{x}_1$	$\ln \tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\ln \tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	$\ln \tilde{x}_3$	$\tilde{x}_4$	$\ln \tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$	$\ln \tilde{x}_5$	$\tilde{x}_6$	$\ln \tilde{x}_6$
Верхній (+)	5	1,609	3	$1,09_9$	2	0,693	60	4,094	10	2,302	5	1,609
Нульовий (0)	4	–	2	–	1	–	40	–	6	–	4	–
Нижній (–)	3	1,099	1	0	1	0	20	2,996	2	0,693	3	1,099

Після математичної обробки результатів експерименту було отримано модель для визначення часу оперативного розгортання сил і засобів пожежогасіння (хв.):

$$\tau_{роз} = 6,89 N_e^{-0,146} N_{ац.е}^{0,44} N_{ац.б}^{0,14} N_p^{-0,06} N_A^{0,05} N_B^{-0,05}. \quad (22)$$

Для проведення комплексу експериментів щодо тривалості локалізації і гасіння пожеж на відкритих складах пиломатеріалів було виконано дослідів  $N_{лок}=2^{3-1}=4$  при кількості повторень  $r = 2$ . Розглядали вплив таких факторів на тривалість локалізації і гасіння пожежі на відкритому складі пиломатеріалів: площа локалізації  $S_{лок}$ ; кількість ручних пожежних стволів типу А  $N_A$ ; кількість ручних пожежних стволів типу Б  $N_B$ . Результати кодування факторів, які досліджувалися, наведено в табл. 2.

## Кодування та рівні зміни факторів

Рівні факторів	$S_{лок}$		$N_A$		$N_B$	
	$\tilde{x}_1$	$\ln \tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\ln \tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	$\ln \tilde{x}_3$
Верхній (+)	56,3	4,03	2	0,693	2	0,693
Нульовий (0)	42,23	–	1	–	1	–
Нижній (–)	28,15	3,34	1	0	1	0

Після математичної обробки результатів експерименту було отримано модель для визначення часу локалізації пожежі на відкритому складі пиломатеріалів (хв.):

$$\tau_{лок} = 0,93 S_{лок}^{1,07} N_A^{-0,55} N_B^{-0,289}. \quad (23)$$

Для визначення часу гасіння пожежі після закінчення операції локалізації використовували залежність  $\tau_e = \tau_{лок}(S_{П}/S_{лок})$ . Результати аналізу отриманих емпіричних моделей дають підстави для таких висновків: зі збільшенням кількості відділень для ліквідації пожежі зменшується тривалість оперативного розгортання; на тривалість гасіння пожежі впливає насамперед співвідношення площі пожежі і площі локалізації (наприклад, зі збільшенням цього співвідношення у 3,6 разу час гасіння пожежі збільшується в 11 разів).

**У восьмому розділі «Оптимізація методів і засобів протипожежного захисту з метою забезпечення пожежної безпеки та підвищення ефективності ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах»** розглянуто методи прогнозування виникнення пожежі на деревообробних підприємствах, результати аналізу яких дали змогу сформулювати складові математичної моделі протипожежного захисту. Головним складником при розробленні математичної моделі протипожежного захисту було взято залежність для визначення пожежного ризику, який вказує на відповідну ймовірність оперативної реалізації системи протипожежного захисту у разі виникнення пожежі на об'єкті. Водночас не розглядалися питання застосування пожежних ризиків для визначення необхідної кількості протипожежних засобів у цехах деревообробних підприємств з метою мінімізації наслідків у разі виникнення пожежі. Тому є потреба в точнішому прогнозуванні для цехів деревообробних підприємств з урахуванням пожежного ризику необхідних протипожежних заходів з метою мінімізації збитків у разі виникнення пожежі. Розв'язати цю проблему можна, передусім, якщо розробити і використовувати оптимізаційну математичну модель для обґрунтованого забезпечення системою протипожежного захисту об'єкта з урахуванням пожежного ризику.

Для прийняття оптимальних рішень під час визначення системи протипожежного захисту об'єкта за критерій оптимізації були взяті прямі збитки від пожежі  $Z_o$  і витрати на протипожежний захист  $B_o$ . Тобто сума цих складових критерію при оптимальному визначенні системи протипожежного захисту об'єкта повинна бути мінімальною.

На підставі прийнятої концепції було розроблено оптимізаційну математичну модель для визначення методів і засобів протипожежного захисту об'єкта з урахуванням допустимого значення пожежного ризику:

функція мети

$$\varepsilon_o \Rightarrow \min \leq [\varepsilon_o]; \quad (24)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq \delta_{n.c} \leq b_1; a_2 \leq \delta_{n.o} \leq b_2; a_3 \leq \delta_{n.з} \leq b_3; a_4 \leq \delta_{c.з} \leq b_4; p \geq [p], \quad (25)$$

де  $\varepsilon_o$  – значення пожежного ризику для об'єкта захисту;  $[\varepsilon_o]$  – допустиме значення пожежного ризику;  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – мінімальні значення обмежень;  $b_1, b_2, b_3, b_4$  – максимальні значення обмежень;  $p$  – ймовірність потрапляння досліджуваної  $i$ -ї точки в область допустимих розв'язків ( $p=k/N$ , де  $k$  – кількість циклів роботи програми, при яких досліджувані точки потрапили в область допустимих розв'язків;  $N$  – загальна кількість циклів роботи програми);  $[p]$  – допустиме значення ймовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення;

$$\delta_{n.c} = \frac{N_{n.c}}{N_{n.c.d}}, \quad \delta_{n.o} = \frac{N_{n.o}}{N_{n.o.d}}, \quad \delta_{n.з} = \frac{N_{n.з}}{N_{n.з.d}}, \quad \delta_{c.з} = \frac{N_{c.з}}{N_{c.з.d}} \quad -$$

співвідношення потрібної кількості пожежних сповіщувачів, пожежних оповіщувачів, протидимних пристроїв, систем завіс до їх дійсної кількості на об'єкті захисту.

На підставі оптимізаційної математичної моделі для визначення методів і засобів протипожежного захисту об'єкта з урахуванням допустимого значення пожежного ризику було розроблено блок-схему алгоритму її розв'язку. На підставі розробленої блок-схеми алгоритму було написано програму на мові C# для роботи в середовищі Windows XP.

У процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначаються значення  $\varepsilon_o$  та критеріїв  $Z_o$  і  $B_o$ , які перевіряються зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконуються доти, доки буде виконана умова  $p \geq [p]$ . Після завершення роботи програми на друк видаються такі дані: значення пожежного ризику для об'єкта захисту  $\varepsilon_o$ , тривалість вільного горіння  $\tau_{в.г.}$ ,  $S_{II}$  до і після впровадження протипожежних засобів; типи протипожежних засобів, їх вартість і кількість та загальні додаткові витрати на їх придбання.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведені результати розв'язування актуальної проблеми розвитку наукових основ ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах шляхом оптимізації організаційно-технічних заходів за критерієм мінімуму збитків.

1. Встановлено, що приміщення цехів деревообробних підприємств відносять до категорії В із характеристикою їх як пожежонебезпечні. Результати розгляду й аналізу математичних моделей тепломасообміну при пожежі показали, що їх використовували головню для аналізу пожеж у приміщеннях житлових будівель, торговельно-розважальних центрів, атріумів тощо. Досі не підлягали розгляду питання прогнозування тепломасообміну при пожежі у приміщеннях деревообробних цехів з визначенням критичного часу пожежі для різних можливих ситуацій. Немає напрацьованих критеріїв та методології для оцінки забезпеченості деревообробного цеху системами протипожежного захисту на випадок виникнення пожежі для її оперативної ліквідації.

Найявні математичні моделі пожеж для відкритих складів лісоматеріалів розроблено з використанням теорії ймовірності і для прогнозування розвитку пожежі на складі необхідно використовувати результати експериментів, а саме середньомірну ідентифікацію розвитку пожежі.

У літературі немає обґрунтованих методів вибору оптимальних тактичних прийомів ліквідації пожеж як для цехів деревообробних підприємств, так і для відкритих складів лісоматеріалів. Результати аналізу сучасного стану в галузі забруднення навколишнього середовища токсичними речовинами від пожеж на деревообробних підприємствах, особливо від пожеж на складах пило- і лісоматеріалів, показали, що практично ці питання ще не розглядали.

2. Вперше розроблено оптимізаційну математичну модель і пакет прикладних програм для визначення оптимальної кількості і площі пожежних відсіків у закритих приміщеннях деревообробних цехів. Доказано, що використання пожежних відсіків зменшує швидкість поширення пожежі в закритому приміщенні цеху в 1,8 разу. Для обґрунтованого підтвердження цього висновку використовували удосконалену для досліджень пожежних ситуацій у деревообробному цеху систему FDS, яка дозволила визначити критичний час пожежі, швидкість поширення пожежі, температурні поля та виділення диму і токсичних речовин.

3. Результати досліджень тривалості поширення пожежі в закритому приміщенні деревообробного цеху загальною площею 14 тис. м<sup>2</sup> при різних пожежних ситуаціях показали, що залежно від місця виникнення осередку



вся площа цеху може бути охоплена пожежею в межах 15...33,4 хв. У межах цього часу неможливо ліквідувати пожежу силами пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС. Тому рекомендується на деревообробних підприємствах організувати добровільні пожежно-рятувальні служби, які зможуть у разі виникнення пожежі розпочати її ліквідацію до приїзду пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС.

4. Вперше розроблено з використанням графових моделей методологію визначення швидкості поширення фронту пожежі на відкритих складах лісоматеріалів, яка дозволяє залежно від виду лісоматеріалів і місця виникнення пожежі визначати швидкість поширення фронту пожежі по кварталу складу та площу пожежі залежно від тривалості вільного горіння. Встановлено, що швидкість фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів за однакових умов приблизно у 3...3,5 разу більша від швидкості фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів. Результати аналізу графових моделей показали, що зі збільшенням швидкості вітру до 10 м/с, якщо порівняти з безвітряною погодою, швидкість фронту пожежі: 1) при бічному вітрі  $\alpha_s = 45^\circ$  збільшується на 21,4%; 2) при попутному вітрі  $\alpha_s = 90^\circ$  збільшується на 26,6%; 3) при зустрічному вітрі  $\alpha_s = 270^\circ$  зменшується приблизно у 3,5 разу.

5. Вперше розроблено математичні моделі, алгоритми і програми для ПЕОМ з метою оптимізації кількості сил і засобів пожежогасіння у приміщеннях цехів та на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів деревообробних підприємств, які дають змогу оперативно розв'язувати задачу оптимізації сил і засобів пожежогасіння за критерієм мінімуму збитків. Для забезпечення ліквідації пожежі потрібно при визначенні кількості пожежної техніки обов'язково враховувати її надійність. Результати досліджень показують, що при врахуванні надійності кількість пожежної техніки необхідно збільшувати приблизно на 16,4%. Крім цього, під час розміщення відкритих складів лісоматеріалів важливо враховувати розу вітрів і розміщувати квартали складів довгою стороною перпендикулярно до вектора напрямку вітру.

Результати аналізу і порівняння з наявними тактиками дають підстави для впровадження в пожежно-рятувальну практику ДСНС обґрунтованих систем для визначення в конкретних умовах варіантів тактики локалізації, з одночасним визначенням сил і засобів для ліквідації пожежі та їх розміщенням в осередку пожежі. Встановлено, що розроблені системи дозволяють завдяки оперативному визначенню тактичних дій зменшити площу пожежі до введення перших стволів у межах до 19,9%.

6. Удосконалена методологія для встановлення класу вогнестійкості кровляних ферм для скатних покрівель за ознакою втрати несучої здатності дає змогу значно зменшити витрати на її визначення. Вперше встановлено,

що вогнестійкість кроквяних ферм скатних покрівель залізобетонної конструкції деревообробних цехів з шириною прольоту 18000 мм, які найчастіше використовують у будівельній практиці, за ознакою втрати несучої здатності належить до класу вогнестійкості **R90**. Цей клас вогнестійкості кроквяних ферм скатних покрівель залізобетонної конструкції повинен бути головною підставою для пожежно-рятувальних підрозділів під час визначення часу ліквідації пожежі.

7. Встановлено методи подачі води для її ефективного використання в процесі захисту від нагрівання штабелів, які не горять і знаходяться перед фронтом пожежі. Оптимальним між віссю пожежного ствола і боковою поверхнею штабеля є кут не більше 20°.

8. Вперше на підставі виконання дробового факторного експерименту та отриманих результатів розроблено математичну модель для обґрунтованого визначення часу оперативного розгортання підрозділів ДСНС при ліквідації пожежі на відкритих складах лісоматеріалів. Результати аналізу математичної моделі показали, що для зменшення тривалості оперативного розгортання передусім потрібно залучати оптимальну кількість пожежно-рятувальних відділень. Наприклад, зі збільшенням кількості відділень від одного до шести тривалість оперативного розгортання зменшується в 1,3 рази.

9. Вперше розроблено математичну модель з використанням дробового факторного експерименту для визначення часу локалізації пожежі при гасінні штабелів пиломатеріалів відкритого складу залежно від площі локалізації та кількості пожежних стволів А і В, які використовують для ліквідації пожежі. Результати експерименту показали, що на тривалість локалізації великою мірою впливає кількість ручних пожежних стволів типу А. Наприклад, зі збільшенням кількості стволів А удвічі тривалість локалізації зменшується в 1,5 рази, а зі збільшенням утричі тривалість локалізації зменшується в 1,9 рази.

10. Вперше розроблено математичну модель, алгоритм розв'язку і написано програму на мові С# для визначення кількості всіх необхідних засобів протипожежного захисту об'єкта, яка дозволяє розробляти і впроваджувати заходи для ефективного захисту деревообробних підприємств у разі виникнення пожежі. Розроблену систему можна також використовувати під час проведення аудиту деревообробних підприємств і розроблення заходів для протипожежного захисту об'єкта.

11. Запропоновано методи оцінювання ефективності дій пожежно-рятувальних підрозділів в процесі ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах з використанням критерію, який охоплює збитки від пожежі і витрати пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі. Застосування програмного комплексу під час ліквідації пожежі на

деревообробних підприємствах дозволяє зменшити збитки майже у 6 разів, якщо порівняти зі збитками від пожеж, ліквідацією яких керували на підставі нормативних документів. Цей ефект досягається завдяки автоматизованому отриманню високоточних прогнозів динаміки пожежі і параметрів організаційно-технічних рішень для введення сил і засобів в осередок пожежі. Розроблені в дисертаційній роботі методи і рекомендації після повного впровадження у практичну діяльність пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України дозволять отримати економічний ефект в сумі 5.7 млн грн.

## СПИСОК ОПУБЛКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті в міжнародних фахових виданнях*

1. Гулида Э. Н. Оптимизация размеров пожарных отсеков цехов деревообрабатывающих предприятий / Э. Н. Гулида, А. М. Коваль // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – Минск : НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций, 2014. – № 1 (35). – С. 55–63.

2. Васильєв М. І. Зменшення екологічного ризику за рахунок оптимізації проектів системи пожежогасіння на складах лісоматеріалів / М. І. Васильєв, І. О. Мовчан, О. М. Коваль // Науковий вісник НГУ (Scopus). – 2014. – № 5. – С. 106–113.

3. Коваль А. М. Скорость распространения фронта пожара на открытых складах круглых лесоматериалов штабельного хранения / А. М. Коваль // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – Минск : НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций, 2015. – № 1. – С. 66–78.

4. Hulida E. Mathematical model of the optimization of fire extinguishing time length in the woodworking enterprises' workshops / E. Hulida, O. Koval // Econtechmod. – Lublin ; Rzeszow, 2015. – Vol. 4, № 1. – P. 18–25.

### *Статті у наукових фахових виданнях*

5. Коваль О. М. Процес розвитку та поширення пожежі в приміщеннях будівель деревообробних підприємств / О. М. Коваль // Пожежна безпека. – 2013. – № 22. – С. 121–127.

6. Коваль О. М. Моделювання розвитку та поширення пожежі на відкритих складах пиломатеріалів / О. М. Коваль // Науковий вісник НЛТУ України. – 2013. – Вип. 23.10. – С. 303–313.

7. Коваль О. М. Швидкість розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів / О. М. Коваль // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2013. – № 13. – С. 123–131.

8. Гуліда Е. М. Вогнестійкість залізобетонних конструкцій скатних крівель одноповерхових будівель цехів деревообробних підприємств / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль // Науковий вісник: НЛТУ України. – 2014. – Вип. 24.7. – С. 166–180.

9. Коваль О. М. Моделювання тактики локалізації та гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів / О. М. Коваль // Пожежна безпека. – 2015. – № 26. – С. 71–85.

10. Гуліда Е. М. Моделювання пожежних ситуацій в приміщеннях будівель деревообробних підприємств / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль // Проблемы пожарной безопасности. – 2014. – Вып. 35. – С. 61–77.

11. Коваль О. М. Математична модель вибору оптимальної тактики гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств / О. М. Коваль, Е. М. Гуліда // Науковий вісник: НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.5. – С. 307–320.

12. Коваль О. М. Визначення критерію прийняття рішення для оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах / О. М. Коваль // Науковий вісник: НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.4. – С. 345–352.

13. Коваль О. М. Математична модель вибору оптимальної тактики гасіння пожеж на складах лісоматеріалів деревообробних підприємств / О. М. Коваль, Е. М. Гуліда // Науковий вісник: НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.6. – С. 272–287.

14. Гуліда Е. М. Надійність пожежної техніки для локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль // Проблемы пожарной безопасности. – 2015. – Вып. 38. – С. 48–57.

15. Коваль О. М. Математична модель визначення потрібної кількості протипожежних засобів у приміщеннях деревообробних цехів / О. М. Коваль, Е. М. Гуліда // Науковий вісник: НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.9. – С. 290–303.

16. Коваль О. М. Оптимізація кількості протипожежних засобів в приміщеннях цехів деревообробних підприємств / О. М. Коваль // Пожежна безпека. – 2015. – № 27. – С. 78–86.

17. Гуліда Е. М. Моделювання тактики локалізації та гасіння пожежі в закритих приміщеннях деревообробних підприємств / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2015. – № 19. – С. 25–36.

18. Гуцуляк В. Ю. Експериментальні дослідження вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, покритих наповненими силіційорганічними сполуками / В. Ю. Гуцуляк, О. М. Коваль, В. Б. Лоїк, С. Я. Вовк // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2013. – № 15. – С. 27–31.

19. Коваль О. М. Тривалість оперативного розгортання підрозділів ДСНС для ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах / О. М. Коваль // Пожежна безпека. – 2016. – № 28. – С. 78–87.

20. Коваль О. М. Експериментальне дослідження тривалості локалізації і гасіння пожеж на відкритих складах пиломатеріалів штабельного зберігання / О. М. Коваль // Науковий вісник: НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.5. – С. 312–318.

21. Коваль О. М. Ефективність використання води для захисту від нагрівання штабелів при пожежі на відкритих складах лісоматеріалів / О. М. Коваль // Науковий вісник: НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.7. – С. 284–291.

### *Патенти*

22. Коваль О. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60898 «Комп'ютерна програма для визначення оптимальних розмірів та кількості пожежних відсіків» / О. М. Коваль – заявник та власник свідоцтва // Дата реєстрації 28.07.2015. – Київ : ДСІВ України.

23. Коваль О. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 61687 «Комп'ютерна програма для вибору оптимального варіанта тактики локалізації і гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств» / О. М. Коваль – заявник та власник свідоцтва // Дата реєстрації 15.09.2015. – Київ : ДСІВ України.

24. Коваль О. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 63480 «Комп'ютерна програма для вибору оптимальної тактики гасіння пожеж на лісоскладах штабельного зберігання» / О. М. Коваль – заявник та власник свідоцтва // Дата реєстрації 11.01.2016. – Київ : ДСІВ України.

25. Коваль О. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68389 «Комп'ютерна програма для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі в приміщенні цеху деревообробного підприємства» / О. М. Коваль – заявник та власник свідоцтва // Дата реєстрації 28.10.2016. – Київ : ДСІВ України.

26. Коваль О. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68390 «Комп'ютерна програма для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі на відкритих складах лісоматеріалів» / О. М. Коваль – заявник та власник свідоцтва // Дата реєстрації 28.10.2016. – Київ : ДСІВ України.

### *Матеріали науково-технічних конференцій*

27. Гуліда Е. М. Надійність пожежної техніки для локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль // XII Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2015. – С. 144–146.

28. Коваль А. М. Обоснование применения пожарных отсеков в цехах деревообрабатывающих предприятий / А. М. Коваль // IV Міжнародна науково-практична конференція «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси : ППБ, 2014. – С. 65–68.

29. Коваль О. М. Оптимізаційна математична модель визначення методів і засобів протипожежного захисту для об'єкта з урахуванням допустимого значення пожежного ризику / О. М. Коваль // Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури». – Київ : УкрНДЦЗ, 2015. – С. 72–74.

30. Гуліда Е. М. Дослідження оптимальної тактики гасіння пожеж на складах лісоматеріалів деревообробних підприємств / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль // Всеукраїнська науково-практична конференція «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки». – Харків : НУЦЗ, 2015. – С. 3.

31. Коваль А. М. Определение скорости распространения фронта пожара на открытых складах круглых лесоматериалов штабельного хранения / А. М. Коваль // VI международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». – Кокшетау : КТИ МЧС РК, 2015. – С. 100–102.

32. Гулида Э. Н. Определение оптимальных размеров пожарных отсеков цехов для деревообрабатывающих предприятий / Э. Н. Гулида, А. М. Коваль // VI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». – Кокшетау : КТИ МЧС РК, 2015. – С. 82–85.

33. Коваль О. М. Обґрунтування оптимальної тактики гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств / О. М. Коваль // Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки». – Харків : НУЦЗ, 2015. – С. 14.

34. Коваль О. М. Зменшення екологічного ризику за рахунок оптимізації протипожежних заходів на складах лісоматеріалів / О. М. Коваль // II Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства, європейський досвід і перспективи». – Львів : ЛДУ БЖД, 2015. – С. 28–29.

35. Коваль О. М. Обґрунтування оптимальної тактики гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств / О. М. Коваль // Інтернет-конференція з міжнародною участю «Проблеми техногенної та природної безпеки: міжнародне партнерство у надзвичайних ситуаціях». – Черкаси : ППБ ім. Героїв Чорнобиля, 2015. – С. 16–19.

36. Коваль О. М. Визначення необхідної кількості протипожежних засобів в приміщеннях цехів деревообробних підприємств / О. М. Коваль // Всеукраїнська науково-практична конференція «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки». – Київ : УкрНДЦЗ, 2016. – С. 64–66.

## АНОТАЦІЯ

**Коваль О. М. Розвиток наукових основ попередження та ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Харків, 2017.

Дисертаційна робота присвячена подальшому розвитку наукових основ попередження та ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах. Було розроблено математичні моделі для оптимізації вибору сил і засобів пожежогасіння під час ліквідації пожеж у закритих приміщеннях деревообробних цехів і на відкритих складах лісоматеріалів з урахуванням надійності системи пожежогасіння. Розроблені блок-схеми алгоритмів розв'язку моделей і написані програми дозволили значно підвищити ефективність ліквідації пожеж. Також розроблено математичні моделі оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж у цехах деревообробних підприємств і на відкритих складах лісоматеріалів, які ґрунтувалися на моделюванні й аналізі пожежних ситуацій. На їх основі написано програми, які можна використовувати для розроблення планів пожежогасіння та для оперативного визначення першочергових завдань пожежно-рятувальним підрозділам для ліквідації пожежі. Розроблена оптимізаційна математична модель і пакет прикладних програм для визначення оптимальної кількості і площі пожежних відсіків в закритих приміщеннях деревообробних цехів дозволяє зменшити швидкість поширення пожежі в закритому приміщенні цеху в 1,8 разу. Показано, що пожежі на відкритих складах лісоматеріалів впливають на екологічну безпеку. Встановлено, що впливовим чинником є швидкість вітру. Зменшення швидкості вітру під час пожежі, наприклад, у два рази, зменшує об'єм розповсюдження продуктів горіння приблизно удвічі і в деяких випадках завдяки збільшенню концентрації токсичних продуктів у зменшеному об'ємі унеможливується перебування людини на цій території. Для зменшення часу вільного горіння під час пожежі розроблено математичну модель, алгоритм розв'язку і написано програму для визначення кількості всіх необхідних засобів протипожежного захисту об'єкта. Крім цього, використання цієї моделі дозволяє розробляти і впроваджувати заходи для ефективного захисту деревообробних підприємств у разі виникнення пожежі.

**Ключові слова:** деревообробне підприємство, математична модель, пожежа, пожежна ситуація, локалізація пожежі, ліквідація пожежі, пожежно-рятувальні підрозділи, пожежний ствол.

## АННОТАЦІЯ

**Коваль А. М. Развитие научных основ предупреждения и ликвидации пожаров на деревообрабатывающих предприятиях.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.02 – пожарная безопасность. – Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, 2017.

Диссертация посвящена дальнейшему развитию научных основ предупреждения и ликвидации пожаров на деревообрабатывающих предприятиях. Были разработаны математические модели для оптимизации выбора сил и средств пожаротушения при ликвидации пожаров в закрытых помещениях деревообрабатывающих цехов и на открытых складах лесоматериалов с учетом надежности системы пожаротушения. Разработаны блок-схемы алгоритмов решения моделей и написаны программы, которые позволили значительно повысить эффективность ликвидации пожаров. Также разработаны математические модели оптимизации тактики локализации и тушения пожаров в цехах деревообрабатывающих предприятий и на открытых складах лесоматериалов, которые базировались на моделировании и анализе пожарных ситуаций. На их основе написаны программы, которые могут быть использованы для разработки планов пожаротушения и для оперативного определения первоочередных задач пожарно-спасательным подразделениям для ликвидации пожара. Разработана оптимизационная математическая модель и пакет прикладных программ для определения оптимального количества и площади пожарных отсеков в закрытых помещениях деревообрабатывающих цехов позволяет уменьшить скорость распространения пожара в закрытом помещении цеха в 1,8 раза. Показано, что пожары на открытых складах лесоматериалов влияют на экологическую безопасность. Установлено, что влиятельным фактором является скорость ветра. Уменьшение скорости ветра при пожаре, например, в два раза, уменьшает объем распространения продуктов горения примерно в два раза и в некоторых случаях за счет увеличения концентрации токсичных продуктов в уменьшенном объеме исключается пребывание человека на этой территории. Для уменьшения времени свободного горения при пожаре разработана математическая модель, алгоритм решения и написана программа для определения количества всех необходимых средств противопожарной защиты объекта. Кроме того,



использование этой модели позволяет разрабатывать и внедрять мероприятия для эффективной защиты деревообрабатывающих предприятий при возникновении пожара.

**Ключевые слова:** деревообрабатывающее предприятие, математическая модель, пожар, пожарная ситуация, локализация пожара, ликвидация пожара, пожарно-спасательные подразделения, пожарный ствол.

## SUMMARY

**Koval O. M. Development of scientific basis of prevention and liquidation of fires for wood-refining enterprises.** – Printed as a manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 21.06.02 – fire safety. – National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, 2017.

Dissertation is devoted to the further development of scientific bases of prevention and liquidation of fires in the wood-processing enterprises. On this basis, developed and proposed optimization model to determine the forces and fire extinguishing means with regard to their reliability, optimal variant contain and extinguish the fire, the number of all the necessary fire protection facility, as well as the optimal number and area of fire compartments indoors woodworking shops that allow improve the efficiency of fire-rescue units at liquidation of fires through the optimization of organizational and technical measures.

The first section deals with the state of fire safety problems and limit the spread of fire in the wood-processing enterprises. The classification of wood processing enterprises with modern methods and means of fire protection and fire safety systems. The analysis of fire models and methods of extinguishing. The effect of fire safety equipment and supplies on the tactical activities of fire and rescue services and fire suppression process. The modern methods for determining and increasing the fire resistance of building structures woodworking companies in order to provide fire suppression within the allowable time of fire resistance.

The second section describes the main design features of the premises of shops woodworking enterprises forecasting and modeling the spread of fire in these areas. Based on modeling at the speed of fire spreading in buildings shops woodworking enterprises. To reduce fire propagation velocity was proposed model for determining the optimum number and area of fire compartments, which reduces the rate of fire spread indoors shop 1.8 times.

The third section describes the main design features open storage timber and simulated fire situations and the speed of fire spreading on the open storage timber. Also discussed and been analyzed the effect of fire hazards in open warehouses woodworking companies on environmental ecology.

In the fourth section presents the mathematical model of optimization of forces and means of fire suppression in the wood-processing enterprises, taking into account the reliability of fire equipment and the use of advanced optimization criterion. The investigation and analysis of the forces and means of fire suppression as a function of the main factors of fire and fire-fighting system reliability. The results of analysis of the impact probability of failure of the number of fire and rescue departments and units for extinguishing fire showed that a change in the probability of failure-free operation of the entire fire fighting system from 0.7 to 0.95 the number of branches decreased by 1.2 times, while the number of trunks to B fire extinguishing – 1.3 times.

The fifth section deals with the theoretical position of evaluating the fire resistance of building structures for woodworking companies. Results of the research showed that the developed methodology for establishing the fire resistance class of the roof trusses for pitched roofs on the grounds of loss of the bearing capacity allows, if the quality of manufacturing firm, set fire resistance class without having to fire tests.

In the sixth section discusses the theoretical basis of the tactics of localization and extinguishing fires in woodworking factories. Optimization model of localization of the fire in the plant indoors and on the open storage timber. In this case the estimation of efficiency of use of water for protection from heat stacks, which do not burn and are in front of the fire front. Comparative analysis and evaluation of optimum tactical methods of containment and extinguishing existing showed that the developed system allows rapid identification by tactical actions to reduce the area of the fire before the first barrel within 19.9%.

In the seventh section, imposed by the results of experimental studies of tactical methods of localization and liquidation of fires in the wood-processing enterprises. We investigated during rapid deployment of fire-rescue units and time localization and extinguishing stacks of lumber. These results will greatly improve the efficiency of fire suppression in the wood-processing enterprises.

In the eighth section is considered the optimization of methods and means of fire protection in order to ensure fire safety and efficiency of fire suppression in the wood-processing enterprises. Submitted by the economic efficiency of the implementation of methods and means of fire protection, and increasing the effectiveness of containment and extinguishing fires in woodworking factories.

**Keywords:** woodworking industry, mathematical model, fire, fire situation, location of fire, fire suppression, fire and rescue units, fire barrel.

Підписано до друку 21.09.2017 р.  
Формат 60×84/16.  
Папір друкарський. Ум. друк. арк. 1,9.  
Зам. № 223. Наклад 150 пр.

Видавництво «ПАІС»  
Реєстраційне свідоцтво ДК № 3173 від 23 квітня 2008 р.  
вул. Гребінки 5, оф. 1, м. Львів, 79007  
тел.: (032) 255-49-00, (032) 261-24-15  
e-mail: pais.druk@gmail.com; <http://www.pais.com.ua>