

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ  
ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

ГУЛІДА Е.М., КОВАЛЬ О.М

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЛІКВІДАЦІЯ ПОЖЕЖ  
НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ**

МОНОГРАФІЯ

ЛЬВІВ – 2017

УДК 614.843(075.32)

*Рекомендовано Вченою радою Львівського державного університету  
безпеки життєдіяльності. Протокол № 10 від 8 червня 2017 р.*

Рецензенти: **Демчина Б.Г.** – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка»;

**Озарків І.М.** – доктор технічних наук, професор, Львівський національний лісотехнічний університет України;

**Шахбазов Я.О.** – доктор технічних наук, професор, Українська академія друкарства.

**Е.М. Гуліда, О.М. Коваль.**

**Забезпечення пожежної безпеки та ліквідація пожеж на деревообробних підприємствах.** Монографія. – Львів: Видав. ПАІС, 2017. – 365 с.

У монографії розглядаються наукові основи ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах. Розроблені математичні моделі для оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж, вибору сил і засобів пожежогасіння при ліквідації пожеж в закритих приміщеннях деревообробних цехів і на відкритих складах лісоматеріалу з урахуванням надійності системи пожежогасіння. Розроблені блок-схеми алгоритмів розв'язку моделей і написані програми дозволили значно підвищити ефективність ліквідації пожеж.

Розроблена оптимізаційна математична модель і пакет прикладних програм для визначення оптимальної кількості і площі пожежних відсіків в закритих приміщеннях деревообробних цехів. Розроблена математична модель, алгоритм розв'язку і написана програма для визначення кількості всіх необхідних засобів протипожежного захисту об'єкта.

**ISBN 978-617-7065-6**

© Гуліда Е.М., Коваль О.М., 2017.

© Видав. ПАІС, 2017.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b> .....	7
<b>РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ</b> .....	12
1.1. Деревообробні підприємства та їх класифікація .....	12
1.2. Статистика пожеж.....	15
1.3. Аналіз небезпечних чинників пожежі на деревообробних підприємствах та їх вплив на екологію зовнішнього середовища.....	18
1.4. Сучасні методи і засоби протипожежного захисту та системи забезпечення пожежної безпеки на деревообробних підприємствах .....	22
1.5. Аналіз моделей пожеж на деревообробних підприємствах .....	27
1.5.1. Особливості горіння деревини .....	27
1.5.2. Пожежна небезпека деревини та її виробничих відходів .....	30
1.5.3. Моделі тепломасообміну при пожежі в приміщенні цеху .....	32
1.5.4. Моделі пожеж для відкритих складів лісоматеріалів .....	37
1.5.5. Обмеження розповсюдження пожежі на деревообробних підприємствах.....	41
1.5.6. Гасіння пожеж на деревообробних підприємствах.....	52
1.5.7. Вплив надійності пожежної техніки та спорядження на оперативну-тактичну діяльність пожежно-рятувальних служб та процес ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах .....	56
1.6. Сучасні методи визначення та підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій деревообробних підприємств.....	59
1.7. Висновки .....	61
<b>РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖНИХ СИТУАЦІЙ З ОЦІНКОЮ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕННЯХ БУДІВЕЛЬ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ</b> .....	64
2.1. Основні конструктивні особливості приміщень цехів деревообробних підприємств.....	64
2.2. Моделювання прогнозування розповсюдження пожежі в закритих приміщеннях.....	66

2.3. Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі в приміщеннях цехів деревообробних підприємств.....	72
2.4. Вплив пожежних відсіків цехів деревообробних підприємств на швидкість розповсюдження пожежі та оптимізація їх розмірів .....	83
2.5. Висновки .....	93

**РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖНИХ СИТУАЦІЙ РОЗВИТКУ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ НА ВІДКРИТИХ СКЛАДАХ ЛІСОМАТЕРІАЛІВ ПІДПРИЄМСТВ.....94**

3.1. Основні конструктивні особливості відкритих складів лісоматеріалів деревообробних підприємств та постановка завдання.....	94
3.2. Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі на складах пиломатеріалів.....	97
3.3. Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі на складах круглих лісоматеріалів .....	107
3.4. Вплив небезпечних чинників пожежі на відкритих складах деревообробних підприємств на екологію навколишнього середовища .....	119
3.5. Висновки .....	134

**РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ СИЛ І ЗАСОБІВ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖІ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ.....136**

4.1. Вихідні положення.....	136
4.2. Вибір та обґрунтування критерія оптимізації.....	137
4.3. Статистичне моделювання надійності пожежної техніки для локалізації та гасіння пожежі.....	145
4.4. Математичні моделі оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах з урахуванням надійності пожежної техніки .....	157
4.4.1. Модель та алгоритм оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі в приміщенні будівлі цеху .....	157
4.4.2. Модель та алгоритм оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі на відкритих складах лісо і пиломатеріалів.....	169

4.5. Дослідження сил і засобів ліквідації пожежі у функціональній залежності від основних чинників пожежі та надійності системи пожежогасіння .....	177
4.5.1. Дослідження при ліквідації пожежі в приміщені будівлі цеху .....	177
4.5.2. Дослідження при ліквідації пожежі на відкритих складах...	180
4.5.3. Аналіз отриманих результатів .....	185
4.6. Висновки .....	188

## **РОЗДІЛ 5. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТАКТИКИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ.....191**

5.1. Локалізація пожежі на деревообробних підприємствах .....	191
5.1.1. Локалізація пожежі в закритому приміщені цеху .....	191
5.1.2. Локалізація пожежі на відкритих складах лісо і пиломатеріалів .....	192
5.2. Моделювання тактики локалізації та гасіння пожежі.....	193
5.2.1. В закритому приміщені цеху .....	193
5.2.2. На відкритих складах лісо і пиломатеріалів .....	210
5.3. Оцінка ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів, які не горять і знаходяться перед фронтом пожежі .....	223
5.4. Алгоритми розв'язку задач по визначенню оптимальних тактичних методів локалізації та гасіння пожежі.....	231
5.4.1. Алгоритм тактики локалізації та гасіння пожежі в закритих цехах та чисельне дослідження тривалості ліквідації пожежі .....	231
5.4.2. Алгоритм тактики локалізації та гасіння пожежі на відкритих складах та чисельне дослідження тривалості ліквідації пожежі.....	238
5.5. Порівняльний аналіз та оцінювання оптимальних тактичних методів локалізації і гасіння пожежі з існуючими .....	242
5.6. Висновки .....	246

## **РОЗДІЛ 6. ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

<b>ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ</b>	<b>247</b>
6.1. Методи прогнозування виникнення пожежі на деревообробних підприємствах.....	247
6.2. Складові математичної моделі протипожежного захисту деревообробних підприємств.....	249
6.3. Математична модель визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємствах .....	262
6.4. Програмна реалізація моделей та алгоритмів .....	264
6.5. Економічна ефективність впровадження методів і засобів протипожежного захисту та підвищення ефективності локалізації і гасіння пожеж на деревообробних підприємствах .....	273
6.6. Висновки .....	275
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>277</b>

## ПЕРЕДМОВА

Пришвидшення темпів науково-технічного прогресу як вирішального чинника підвищення ефективності виробництва є головною умовою інтенсифікації сучасної промисловості України. Деревообробна промисловість нашої країни займає одно із ведучих місць серед багатьох інших галузей. Ведучою ланкою цієї галузі є деревообробні підприємства, які переробляють деревину і випускають продукцію для потреб народного господарства, продукцію народного вжитку тощо. Дуже часто на цих підприємствах виникають пожежі, які призводять до значних збитків. Наприклад, тільки за 2011 рік по Україні на деревообробних підприємствах виникло 93 пожежі, що призвело до 3962 тис. грн прямих збитків, які складають 0,5% від загальних прямих збитків всіх пожеж нашої країни за 2011 рік (у 2011 році було зареєстровано 60790 пожеж). За 2012 рік виникло 76 пожеж, що призвело до прямих збитків в розмірі 5421 тис. грн. На протипожежний захист деревообробних підприємств здійснюють суттєві витрати з одночасним удосконаленням протипожежного законодавства. Але потенціальна пожежна безпека дуже часто все-таки не реалізується. Економіка всіх країн відчуває несприятливу дію чинників, які пов'язані зі зростанням кількості пожеж і тяжкістю їх наслідків. За даними УкрНДЦЗ ДСНС України тільки за останні роки згідно із середніми статистичними даними на Україні за рік виникає 61000 пожеж, на яких гине унаслідок пожеж до чотирьох тисяч чоловік.

Протягом, наприклад, 2014 року на Україні виникло 68869 пожеж, на яких загинуло 2246 людей, а врятовано на пожежах 2614 людини, матеріальних цінностей збережено на суму понад 67,4 млрд. грн, збережено від вогню 31006 будівель і споруд тощо [102]. Всі ці досягнення отримано завдяки оперативній роботі пожежно-рятувальних підрозділів Державної служби надзвичайних ситуацій України.

Проблема пожеж у нашому суспільстві не втрачає гостроти. Тому підвищення пожежної безпеки деревообробних підприємств та забезпечення

ефективності функціонування пожежно-рятувальних підрозділів в процесі ліквідації пожеж – один з основних напрямків роботи всіх служб 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 на пожежну безпеку знайшов диференцьований 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. Такий підхід має значні переваги над іншими. Наприклад, тільки від покращання профілактичної роботи на об'єктах, які підконтрольні органам ДПН, кількість пожеж на цих об'єктах зменшилася майже в 3,4 рази.

Ефективність 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.

Значна кількість закордонних фірм і наукових центрів спеціалізуються на розробленні інформаційних технологій з розробленням 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 Росії 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 по захисту деревообробних підприємств і ліквідації пожежі регламентуються рядом нормативних документів. Але, не зважаючи на заходи, які приймаються, кількість пожеж на деревообробних підприємствах залишається практично незмінною на протязі останніх 10 років (90...100 пожеж за один рік [100, 101]). Це вказує на те, що можливо існує недостатність сил і засобів або неефективне їх використання та недостатнє врахування різних факторів, які впливають на виникнення та розвиток пожежі.

Для розв'язування цієї проблеми потребується розроблення комплексу різних математичних моделей, які будуть адекватно описувати процеси, що впливають на виникнення пожежі, на її розповсюдження, на визначення достатньої кількості сил і засобів для локалізації і ліквідації пожежі як в закритих приміщеннях цехів, так і на відкритих складах лісоматеріалів, а також розроблення рекомендацій пожежно-рятувальним підрозділам.

В науково-технічній літературі наведені моделі, які частково розглядають проблемні питання процесів поширення та ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах: моделі тепломасообміну при пожежі в закритих приміщеннях розглянуто в роботах В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмарова, І.С. Молчадського, А.Н. Шевлякова, А.М. Рижова, С.В. Пузача Х.І. Ісхакова, Р.Ш. Хабібুলіна, Е.М. Логачева, М. Morita, К. Satoh; моделі розвитку та поширенню пожеж на відкритих складах лісоматеріалів наведено в роботах М.П. Копилова, О.М. Курбатського, П.П. Девлишева, М.О. Іванова, М.С. Артем'єва, С.В. Горшкова, С.S. Tarifa, Р.Р. Notario, F.G. Moreno; форма факела і теплове випромінювання від нього розглянуто в роботах Л.М. Куценко, О.П. Созника, О.Є. Басманова, А.Д. Кузика, D. Drysdale; питання гасіння пожеж розглянуто в роботах Ю.О. Абрамова, О.М. Дигала, М.В. Литвина, Е.М. Гуліди, В.П. Садкового, О.А. Тарасенка, І.О. Мовчана; питання оптимізації ліквідації пожежі – в роботах І.О. Доррера, В.М. Груманса, С.Ф. Кривошликова, С.В. Ушанова, Е.М. Гуліди, І.О.Мовчана, О.А. Тарасенка, О.Є. Басманова, Д.М. Войтовича, О.О. Смотри та інших.

Стосовно закритих приміщень цехів деревообробних підприємств при наявності розглянутих результатів досліджень зовсім не розглядалося моделювання пожежних ситуацій 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 сьогоднішній день відсутня вдосконалена методологія її визначення. Крім цього, не розглядалися питання оптимізації тактичних дій в процесі ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах.

Сучасний розвиток обчислювальної техніки дає можливість виконувати нові підходи до аналізу пожежних ситуацій на деревообробних підприємствах, враховувати випадковий характер розвитку пожежі, будувати математичні моделі, які більш точно описують процес розвитку пожежі та її ліквідації. Такі моделі дадуть можливість оцінити можливі шляхи розповсюдження пожежі, виділити першочергові завдання по забезпеченню деревообробного об'єкта протипожежними засобами і відшукати оптимальні заходи з метою зменшення збитків від пожежі та зменшення витрат на ліквідацію пожежі за рахунок підвищення ефективності пожежно-рятувальних підрозділів при її ліквідації.

Таким чином, розв'язок науково-практичної проблеми ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах з мінімізацією збитків від пожежі та витрат на її ліквідацію шляхом оптимізації організаційно-технічних заходів, як для об'єкта захисту, так і для пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України, є актуальною задачею.

Автори висловлюють щире подяку рецензентам: доктору технічних наук, професору Б.Г. Демчині, доктору технічних наук, професору І.М. Озарківу, доктору технічних наук, професору Я.О. Шахбазову за корисні поради та критичні зауваги, що сприяли покращенню монографії.

Ця монографія виконана відповідно до наукових напрямків кафедри

пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт Львівського державного університету безпеки життєдіяльності у рамках науково-дослідних робіт «Рекомендації щодо попередження та ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах» (№ ДР 0150U002038), «Рекомендації щодо проектування протипожежних відсіків для закритих приміщень та будівель» (№ ДР 0116U003743), «Визначення оптимальної кількості протипожежних засобів для закритих цехів деревообробних підприємств» (№ ДР 0116U003744).

# РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

## 1.1. Деревообробні підприємства та їх класифікація

Процеси оброблення та переробки деревини об'єднуються у лісопереробній промисловості, до якої входять:

- 1) деревообробна галузь;
- 2) целюлозно-паперова галузь;
- 3) лісохімічна галузь.

До деревообробної галузі входять виробництва, які пов'язані з механічною обробкою деревини. За видами обробки деревообробну галузь можна поділити на чотири основні групи виробництв (рис. 1.1) [165]: 1) лісопильно-деревообробна; 2) клеєних матеріалів і плит; 3) виробів з деревини; 4) спеціального виробництва.

Кожна з цих груп виробництв виконує випуск відповідної продукції.

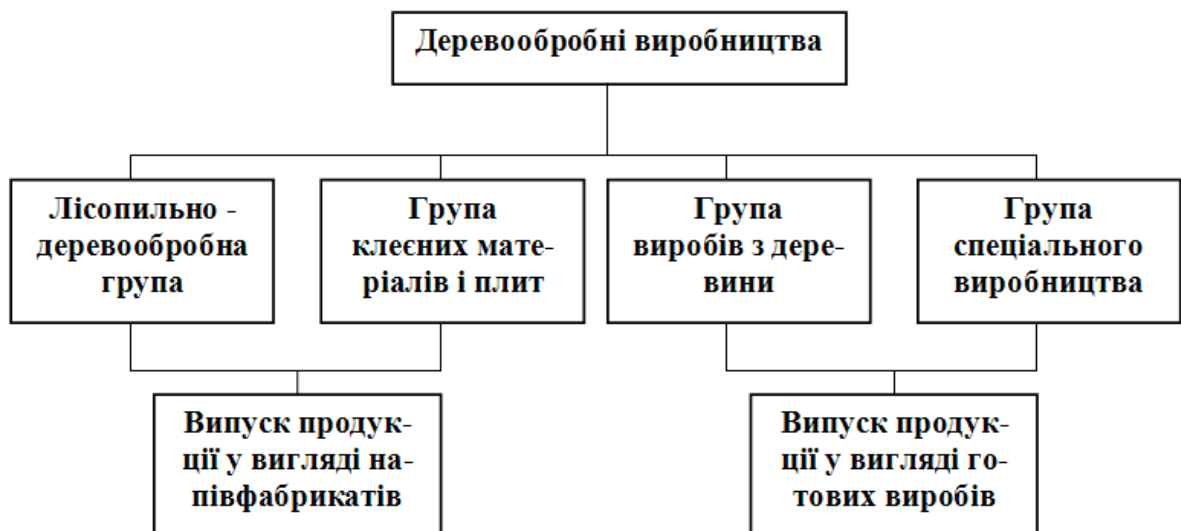


Рис. 1.1. Групи виробництв деревообробної галузі

На рис. 1.2 зображено цех виробництва клеєних матеріалів і плит деревообробного підприємства.



Рис. 1.2. Цех виробництва клеєних матеріалів і плит

Найбільш пожежонебезпечними спорудами є закриті цехи, в яких обробляється деревина. Ці цехи мають значну площу (розміром  $B \times L$  до  $72 \times 144$  м) до  $10368 \text{ м}^2$ , оскільки в них розміщені деревообробні комплекси. Наприклад, тільки один комплекс моделі ОК250С для виготовлення віконних блоків і балконних дверей зі спареними і роздільними стулками займає площу  $9100 \text{ м}^2$  [234]. Безумовно обладнання, яке входить до складу цього комплексу, можна використовувати самостійно для виконання окремих технологічних операцій на всіх деревообробних підприємствах. Крім цього, в цеху мають бути ділянки розкрою пиломатеріалів, виготовлення погонажу, зрощування заготовок за довжиною, ремонту брусків, профільного оброблення, шліфування тощо. На всіх ділянках механічної обробки деревини в більшості випадків виділяється пил, який видаляють з цеху притоково-витяжною вентиляцією. Але повністю очистити повітря цеху від

пилу неможливо, що і є причиною можливого виникнення пожежі внаслідок дії на пил на робочих місцях високих температур. Наприклад, в процесі розрізки деревини фрезою зубці фрези зі сталі Р6М5 нагріваються до температури 600...650 °С, що може стати причиною займання пилу і відповідно виникненню пожежі.

В деревообробних цехах знаходяться 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 і 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 підлоги, на якій вони розміщені, товщини та ступеня дисперсності шару. Крім цього, швидкість вигорання в закритому приміщенні відрізняється від швидкості вигорання на відкритому просторі.

В закритих деревообробних цехах розміщують заготовки і деталі. Сировиною для заготовок і деталей служать пиломатеріали шпилькових і листяних порід деревини. За видом обробки заготовки і деталі поділяють на відповідні види (рис. 1.3): пиляні, клеєні і калібровані. Крім цього, заготовками можуть бути дошкові і брусків матеріали із деревини.

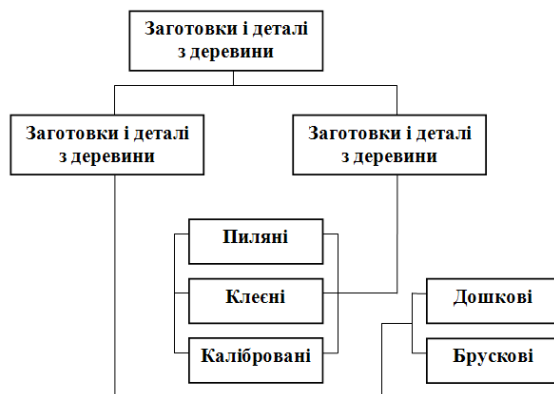


Рис. 1.3. Класифікація заготовок і деталей

В процесі оброблення заготовок в цехах завжди виникає і знаходиться на робочих місцях технологічна тріска, тобто дрібні частини, які одержують внаслідок їх механічної обробки.

Крім закритих цехів, в яких обробляється деревина, також найбільш пожежонебезпечними спорудами є відкриті склади пиломатеріалів і склади круглих лісоматеріалів штабельного зберігання. Площа групи штабелів пиломатеріалів відкритого зберігання, як правило, повинна бути не більше 1200 м<sup>2</sup>. Групи штабелів слід відокремлювати між собою поздовжніми і поперечними розривами. Ширина поздовжніх розривів повинна бути не менше полуторної висоти, поперечних - не менше однієї висоти штабелів. Висота штабелів пиломатеріалів згідно із рекомендаціями [220] коливається в межах 7...12 м. На поздовжніх розривах слід передбачати тверде покриття шириною не менше 3 м для проїзду пожежних машин. Групи штабелів утворюють так званий квартал. Площу кварталу груп штабелів слід приймати не більше 4,5 га, а ширину - не більше 100 м.

Площа кварталу груп штабелів круглих лісоматеріалів слід приймати також не більше 4,5 га. Ширина кожної групи штабелів у кварталі повинна бути не більше 50 м, а квартала не більше 100 м. Розриви між кварталами залежать від висоти штабелів і коливаються в межах 30...50 м.

Таким чином, як видно з наведеного аналізу, деревообробні підприємства є дуже пожежонебезпечними об'єктами. Крім цього, кількість деревообробних підприємств в Україні досягла 441 [97]. За останні роки їх кількість безперервно зростає, що ставить більш жорсткі вимоги для забезпечення їх протипожежного захисту.

## **1.2. Статистика пожеж**

Результати моніторингу УкрНДІЦЗ стану з пожежами в Україні [102] показують на значне зростання кількості пожеж у порівнянні з минулими роками за всіма групами об'єктів. Наприклад, загальна кількість пожеж у

2014 році у порівнянні з 2013 роком зросла на 17,3%, в тому числі на спорудах виробничого призначення – на 18,3%, а на складських спорудах – на 17,6%.

Виконано аналіз потоку пожеж на деревообробних підприємствах починаючи з 2011 року, їх динаміка та причини виникнення. Дуже часто на цих підприємствах виникають пожежі, які призводять до значних збитків. Наприклад, тільки за 2011 рік в Україні на деревообробних підприємствах виникло 93 пожежі, що призвело до 3962 тис. грн прямих збитків, які складають 0,5% від загальних прямих збитків всіх пожеж нашої країни за 2011 рік (у 2011 році було зареєстровано 60790 пожеж) За 2012 рік виникло 76 пожеж, що призвело до прямих збитків в розмірі 5421 тис. грн. Наприклад, 3 березня 2012 року в селищі Дубове Тячівського району загорівся деревообробний цех ТОВ «Лісокомбінат Дубове» (рис. 1.4). Осередком пожежі стала сушильна камера, з якої вогонь поширився усією крівлею будівель. Наслідками пожежі знищені покрівля цеху площею близько 4800 м<sup>2</sup>, сушильні камери, операторська та близько 100 м<sup>3</sup> дощок.



Рис. 1.4. Пожежа в деревообробному цеху ТОВ «Лісокомбінат Дубове» в селищі Дубове Тячівського району

На території ТОВ «Свіспан-Лімітед» в м. Костопіль 20 липня 2012 року виникла пожежа (рис. 1.5), яка принесла також значні збитки [182]. Тільки за 11 місяців 2013 року виникло 82 пожежі з прямими збитками 3941 тис. грн [100]. За 2014 рік на деревообробних підприємствах всього виникло 98 пожеж [101].





Рис. 1.5. Наслідки пожежі на території ТОВ «Свіспан-Лімітед» в м. Костопіль

Основними причинами виникнення пожеж були: несправність виробничого обладнання – 0,2%; порушення правил пожежної безпеки влаштування та експлуатації електроустановок – 18,3%; порушення правил експлуатації печей, теплогенерувальних агрегатів та установок – 7,1%; необережне поводження з вогнем – 62,3%; інші причини – 12,1%.

Аналіз пожеж на деревообробних підприємствах [102, 100, 101, 168] показав, що 64% всіх пожеж відбувається на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів (рис. 1.6). Такий показник пов'язан з тим, що ці склади мають значно більше розповсюдження, ніж деревообробні цехи. Крім наведених причин виникнення пожеж на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів можуть також бути атмосферні грозові розряди.

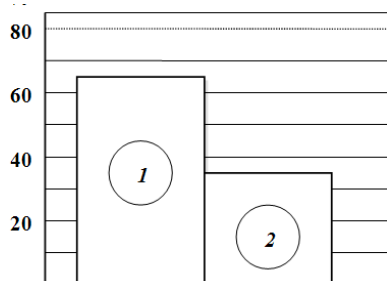


Рис. 1.6. Розподіл пожеж на деревообробних підприємствах:

**1** - на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів (64%); **2** – в деревообробних цехах (36%)

На протипожежний захист деревообробних підприємств витрачають суттєві кошти, Крім цього, проводиться одночасно удосконалення протипожежного законодавства. Але не дивлячись на всі протипожежні заходи, які постійно приймаються, кількість пожеж на деревообробних підприємствах за останні п'ять років практично не змінюється і становить в середньому 90 пожеж на рік. При цьому більшість пожеж носить затяжний характер, що вказує або на недостатність сил і засобів на ліквідацію пожежі, або на не ефективне їх використання, або на недостатнє врахування різних чинників, які впливають на розвиток пожежі.

### **1.3. Аналіз небезпечних чинників пожежі на деревообробних підприємствах та їх вплив на екологію зовнішнього середовища**

Відомо, що екологічна безпека - стан захищеності довкілля і життєво важливих інтересів людини і громадянина від можливої негативної дії господарської і іншої діяльності і погроз виникнення надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру та їх наслідків. У поняття екологічної безпеки входить система регулювання і управління, що дозволяє прогнозувати, не допускати, а у разі виникнення, ліквідовувати розвиток надзвичайних ситуацій. Екологічна безпека реалізується на глобальному, регіональному і локальному рівнях. Локальний рівень включає міста, райони, підприємства металургії, хімічної, нафтопереробної, гірничодобувної промисловостей та інших. Для локального рівня розроблено дуже багато заходів і технологій, які дозволяють на певному рівні забезпечувати екологічну безпеку. В цьому напрямку виконано багато робіт, результати яких на сучасному етапі до деякої міри дозволяють підвищувати ефективність захисту від забруднення навколишнє середовище. Цими роботами займалися відомі вчені: А.Л. Большеротов, В.І. Коробкін, Л.В. Передельский, Є.О. Лобанова, І.І. Мазур, О.І. Молдаванов, М.Г.Рибальський, Т.А. Хоружая, А.Г. Шмаль та багато інших. Дослідженнями проблеми

екологічних ризиків займалися такі вчені, як В.І. Андрейцев, Г.І. Балюк, Н.О. Корнякова, Л. Решітник, Т.О. Третьак, М. Фролов, Т.М. Чебан, А.В. Яблоков та інші. Але розроблені ними методи стосуються лише теоретичних підходів до цієї проблеми, а також питанням очищення води від токсичних речовин, питанням боротьби зі знищенням регіональних і локальних зелених насаджень тощо [171, 172]. Дуже мало робіт присвячено забрудненню навколишнього середовища токсичними викидами від пожеж. Особливо це стосується пожеж на складах лісоматеріалів, де в цій локальній зоні температура середовища перевищує  $70^{\circ}\text{C}$ , густина кисню може стати меншою ніж  $0,226 \text{ кг/м}^3$ , а також може в цій зоні збільшитися більше норми густина оксиду вуглецю  $\text{CO} > 0,00116 \text{ кг/м}^3$ , вуглекислого газу  $\text{CO}_2 > 0,11 \text{ кг/м}^3$ , хлористого водню  $\text{HCl} > 23 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$  та інших токсичних речовин, які можуть загрожувати життю людини. Крім цього, в процесі пожежі утворюється дим, оптична густина якого може бути більша допустимого значення (допустима оптична густина диму  $\mu \leq 1,2 \text{ Нп/м}$ , що забезпечує видимість до 2 м, тобто в межах росту людини, яка при переміщенні повинна бачити підлогу). Такі обставини призводять до перевищення граничнодопустимого екологічного ризику і відповідно до забруднення навколишнього середовища.

Однією з перших наукових праць стосовно розвитку та поширенню пожеж на відкритих складах пиломатеріалів за результатами експериментальних досліджень була оприлюднена робота С.С. Tarifa, Р.Р. Notario, F.G. Moreno на 10-му Симпозіуму по процесах горіння на пожежах в 1965 році в м. Піттсбург (США) [307]. Механізм поширення пожежі був представлений у вигляді розповсюдження іскор і головешок, що горять, які розлітаються під дією конвективної колонки, що утворюється над осередком пожежі. Цей механізм поширення пожежі на відкритих складах був розвинутий в кандидатській дисертації М.С. Артем'єва, яка була захищена в 1981 році в м. Москві (ВІПТШ) [12]. Але в усіх цих дослідженнях зовсім не

розглядають питання екологічної безпеки і не пов'язують пожежний ризик з екологічним ризиком.

В роботі [49] для вирішення проблеми, пов'язаної із забрудненням середовища внаслідок пожеж, була обрана інтегральна модель пожежі, яка дозволяє адекватно оцінити показники масообміну з навколишнім середовищем при пожежі. Метою роботи було визначення забруднення навколишнього середовища від пожеж та його вплив на екологічну безпеку. Авторами встановлено, що 0,16% площі України забруднюється тільки внаслідок пожеж у житлових будівлях. За рік унаслідок пожеж у житлових та адміністративних будівлях виділяється 11,4 тис.т вуглекислого газу, 124 т оксиду вуглецю, 789 т соляної кислоти, 169 т оксидів азоту, 226 т акролеїну та 1,7 т синильної кислоти. Крім цього, встановлено, що при пожежі тільки в одному житловому приміщенні утворюється в середньому хмара об'ємом 507,6 м<sup>3</sup>, в якій концентрація соляної кислоти (HCl) перевищує гранично допустиму концентрацію.

У більшості наукових роботах при розгляді небезпечних чинників пожежі розглядають ризик (в тому числі і екологічний) з позиції впливу на безпеку здоров'я людини. [80, 175]. Щодо ризику стосовно екологічних систем відмітимо наступне. Автори роботи [175] розглядають ступені ризику нанесення збитку екологічній системі, включаючи людину. Під безпекою екологічної системи вони розуміють захист функціональних характеристик екосистеми. Критичним (пороговим) екологічним навантаженням вважається таке, що спричиняє зміни в показниках структурно-функціональної організації популяції, чи біоценозу, які перевищують межі адаптивних можливостей екосистеми. В роботі [10] стверджується, що екологічний ризик – це імовірність загибелі біологічної системи (організму, популяції, населення). В продовження розглянутої роботи автор роботи [79] тільки уточнює поняття екологічного ризику, але не наводить ніяких пропозицій для запобігання впливу чинників техногенного та природного характеру на екологію зовнішнього середовища.

В.І. Андрейцевим було запропоновано концепцію Закону України “Про екологічну (природно-техногенну) безпеку [7], наукова модель якого була розроблена ним у травні 1995 року. Дана Концепція отримала широке визнання та схвалення як міжнародних експертів, так і вітчизняних фахівців-правознавців, екологів, економістів, інших спеціалістів. Зазначений науково-прикладний доробок намітив можливий перелік зобов’язань юридичних і фізичних осіб, котрі експлуатують екологічно небезпечні об’єкти чи здійснюють відповідні види діяльності, спроможні викликати надзвичайні ситуації.

В роботі [249] автор наводить визначення екологічного ризику, в якій вказується, що екологічний ризик – це імовірність настання негативних наслідків для довкілля та/або людини у результаті діяльності суб’єктів екологічних правовідносин або впливу на об’єкти підвищеної екологічної небезпеки природних факторів.

Дуже об’ємно розглянуто питання ризиків техногенного та природного характеру в Україні в роботі [6]. При цьому наводяться математичні залежності з використанням основних положень математичної статистики для визначення компонентної структури головних загроз екологічній безпеці України, що характеризується за допомогою матриці коефіцієнтів кореляції між показниками і головними компонентами (ГК).

Перша головна компонента – основна внутрішня загроза екологічній безпеці України, яка пояснює 41,1 % загальної дисперсії структури множини первинних даних, є: 1) **забруднення навколишнього середовища**; 2) **розміщення хімічнонебезпечних виробництв на території України**, що зумовлені насиченістю промисловості техногенно-небезпечними підприємствами; 3) **неефективне використання природно-ресурсного потенціалу**.

Друга головна компонента пояснює 13,5% загальної дисперсії і найбільший вклад у неї дають: 1) **площа зони радіоактивного забруднення в результаті аварії на ЧАЕС** (коефіцієнт кореляції 0,72); 2) **зони можливих лісових пожеж у пожежонебезпечний сезон** (коефіцієнт кореляції 0,81).

Третю головну компоненту, яка пояснює 11,3 % загальної дисперсії структури множини первинних даних, інтерпретуємо як надзвичайні ситуації природного походження, а саме *землетруси* та *вибухо- і пожежонебезпечні виробництва*. Це є третя основна внутрішня загроза екологічній безпеці України.

До четвертої головної внутрішньої загрози екологічній безпеці України відносять: 1) *зони можливого радіоактивного забруднення при потенційних аваріях на АЕС* (коефіцієнт кореляції 0,70); 2) *зони можливих польових пожеж у пожежонебезпечний сезон* (коефіцієнт кореляції 0,73). Рівень цих загроз становить 9,6 %.

Наведені дані вказують лише на екологічні загрози, які виникли в Україні і на прогнозовані можливі екологічні загрози. При цьому зовсім не враховуються екологічні загрози від пожеж на деревообробних підприємствах, хоча в першій головній компоненті розглянуто *забруднення навколишнього середовища*.

В роботі [235] розглядають сукупність шкідливих впливів на навколишнє середовище, які призводять до незворотної деградації екологічної системи. Автори монографії [175] критичною (пороговою) концентрацією антропогенного чинника у навколишньому середовищі вважають таку, котра спричиняє статистично достовірні зміни в показниках структурно-функціональної організації біоценозу чи популяції, що перевищують межі адаптивних можливостей екологічної системи.

Результат аналізу сучасного стану в галузі забруднення навколишнього середовища токсичними речовинами від пожеж на деревообробних підприємствах, особливо від пожеж на складах пило - і лісоматеріалів, показав, що практично глибоко цими питаннями ще не займалися.

#### **1.4. Сучасні методи і засоби протипожежного захисту та системи забезпечення пожежної безпеки на деревообробних підприємствах**

Розглянути сучасні методи і засоби протипожежного захисту та системи забезпечення пожежної безпеки для всіх груп виробництв деревообробної галузі в одній роботі дуже складно. Тому розглянемо ці питання для найбільш відповідальних з точки зору пожежної безпеки деревообробних підприємств, які займаються випуском продукції у вигляді готових виробів. До таких деревообробних підприємств відносять одноповерхові цехи на базі використання УТС (універсальних типових секцій) зі вставками для розташування допоміжних і санітарно-технічних приміщень через кожні 72 м або 144 м згідно із розмірами УТС [130]. В більшості випадків при цих цехах розміщують склади пило - і лісоматеріалів, на яких зберігають заготівельний матеріал для виготовлення виробів. Ці склади можуть бути для пиломатеріалів як закритими так і відкритими, а для лісоматеріалів – тільки відкритими [50]. Спочатку розглянемо сучасні методи і засоби протипожежного захисту та системи забезпечення пожежної безпеки для закритих приміщень цехів деревообробних підприємств, а після цього – для відкритих складів пило – і лісоматеріалів.

Згідно із ДБН В.2.5-56:2014 [71] до систем протипожежного захисту (СПЗ) відносять: 1) системи пожежної сигналізації; 2) автоматичні системи пожежогасіння; 3) автономні системи пожежогасіння локального застосування; 4) системи оповіщення про пожежу та управління евакуаванням людей; 5) системи протидимного захисту; 6) системи централізованого пожежного спостереження; 7) системи диспетчизації СПЗ.

Також до СПЗ належать: блискавозахист; ліфти пожежні; пожежні кран-комплекти; протипожежні двері, клапани, ворота, завіси (екрани) тощо. Крім цього, деревообробні підприємства повинні бути забезпечені протипожежним водопостачанням у вигляді внутрішніх протипожежних водоводів з кранами, пожежних гідрантів або пожежних водоймищ.

Для *закритих приміщень цехів* використовують *системи пожежної сигналізації* у вигляді пожежних сповіщувачів (дима, полум'я, тепла і комбінованих) та мовлену систему оповіщення. При її організації враховують

такі інформаційні положення [237, 265]: інформування тих, хто надає допомогу; попередження присутніх; керування устаткуванням пожежної автоматики. Така система повинна виявляти пожежу, керувати засобами оповіщення про пожежу та засобами автоматичного протипожежного захисту об'єкта, евакуацією людей, викликати державну службу НС для ліквідації пожежі тощо (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Система пожежної сигналізації (СПС) для протипожежного захисту об'єкта [237]

Аналізуючи звіти відділу пожежогасіння і пожежно-рятувальних робіт ДСНС України, наприклад [41], з урахуванням СПС, можна зробити висновок, що на більшості об'єктах не впроваджують наведені рекомендації в повному обсязі і це призводить до значних збитків від наслідків пожежі.

Наступною системою протипожежного захисту є *автоматичні та автономні системи пожежогасіння*. За видами вогнегасної речовини їх поділяють на системи:



- водяного та пінного пожежогасіння;
- автоматичні системи порошкового пожежогасіння;
- автоматичні системи аерозольного пожежогасіння;
- автоматичні системи газового пожежогасіння.

В закритих приміщеннях деревообробних цехів рекомендовано [71] споруджувати автоматично діючі *спринклерні* або *дренчерні* системи для гасіння пожеж. *Спринклерні* установки можуть бути водяні, повітряні і змішані. Це система труб, прокладених по стелі. Вода в труби потрапляє із водогінної мережі. Спринклерні головки закриті легкоплавкими замками, що розраховані на спрацювання при температурі 72, 93, 141 та 182°C. Площа змочування одним спринклером становить від 9 до 12 м<sup>2</sup>, а інтенсивність подачі води — 0,1 л/с·м<sup>2</sup>. Важлива частина установки — контрольно-сигнальний клапан, котрий пропускає воду в спринклерну мережу, при цьому одночасно подає звуковий сигнал, контролює тиск води до і після клапана. Повітряна система спринклерної установки застосовується в неопалюваних приміщеннях. Трубопроводи в таких системах заповнені не водою, а стисненим повітрям. Вода в них лише досягає клапана, а у випадку зривання головки спочатку виходить повітря, а потім вода. Змішані системи влітку заповнюються водою, а взимку – повітрям.

*Дренчерні* установки обладнуються розбризкувальними головками, які постійно відкриті. Вода подається в дренчерну систему вручну або автоматично при спрацюванні пожежних давачів, котрі відкривають клапан групової дії.

На підставі обстеження багатьох деревообробних підприємств (за даними керівного складу підприємств) було встановлено, що споруджувати в цехах автоматично діючі *спринклерні* або *дренчерні* системи для гасіння пожеж не вигідно внаслідок їх високої вартості. Замість цих систем всі цехи обладнані в залежності від виду пожежного навантаження *ручними вуглекислотними і пінними вогнегасниками*, а також частково *пересувними вуглекислотними*.

*Ручні вуглекислотні* вогнегасники призначені для гасіння невеликих пожеж, всіх видів загорання. Вони приводяться в дію вручну. Через вентиль стиснена рідка вуглекислота прямує у патрубок, де вона розширюється і за рахунок цього її температура знижується до  $-70^{\circ}\text{C}$ . При переході рідкої вуглекислоти в газ її об'єм збільшується в 500 разів. Утворюється снігоподібна вуглекислота, котра при випаровуванні охолоджує горючу речовину та ізолює її від кисню повітря. Корисна довжина струменя вогнегасника приблизно 4 м, час дії 30...60 с. Вогнегасник слід тримати за ручку, для уникнення обмороження рук; зберігати подалі від тепла, для запобігання саморозрядження. Вуглекислотою можна гасити електрообладнання, що знаходиться під напругою, а також горючі рідини і тверді речовини. Не можна гасити спирт і ацетон, котрі розчиняють вуглекислоту, а також терміт, фотоплівку, целулоїд, котрі горять без доступу повітря.

*Ручні хімічні пінні* вогнегасники використовуються для гасіння твердих речовин, що горять, та горючих легкозаймистих рідин з відкритою поверхнею, що горить. Слід мати на увазі, що піна електропровідна — нею не можна гасити електрообладнання, що знаходиться під напругою, вона псує цінне обладнання та папери. Нею не можна також гасити калій, натрій, магній та його сплави, оскільки внаслідок їх взаємодії з водою, наявною в піні, виділяється водень, котрий посилює горіння. В промислових приміщеннях засоби пожежогасіння розташовують згідно з вимогами «Правил пожежної безпеки в Україні». В коридорах, проходах, проїздах або інших місцях, крім вогнегасників, розташовують пожежні щити з набором засобів пожежогасіння.

*Системи оповіщення про пожежу та управління евакуюванням людей*, керування якими здійснюється з приміщення пожежного поста. До цих систем відносять: світлову і звукову сигналізацію з розшифруванням зон оповіщення; модулі запуску і зупинки з вибиранням зон оповіщення, а також

для всього приміщення. На більшості підприємств такі системи впроваджені, але періодична перевірка їх роботи практично не виконується.

*Системи протидимного захисту та централізованого пожежного спостереження, а також системи диспетчизації СПЗ на більшості деревообробних підприємств відсутні. Стосовно, наприклад, системи протидимного захисту технічне керівництво підприємств вважає, що для протидимного захисту можна використовувати притоково-витяжну вентиляційну систему цеху. Але такий підхід до розв'язання цієї задачі є помилковим. Це пояснюється тим, що вже на 10 хв пожежі в зоні осередка пожежі оптична густина диму буде більше 1,2 Нп/м, а видимість менша 1,5 м [51].*

## **1.5. Аналіз моделей пожеж на деревообробних підприємствах**

### **1.5.1. Особливості горіння деревини**

На деревообробних підприємствах деревина є основним матеріалом при виконанні всіх технологічних операцій в процесі виготовлення любого виробу. За своєю структурою вона представляє пористий матеріал з великою кількістю комірок, які заповнені повітрям. Об'єм порожнеч в деревині перевищує об'єм твердої речовини. Співвідношення твердої речовини і порожнеч для деяких порід деревини наведені в табл. 1.1 [48].

Таблиця 1.1

Об'єм твердої речовини і порожнеч деревини

Показники	Дуб	Береза	Сосна
Маса 1 м <sup>3</sup> щільної деревини, кг/м <sup>3</sup>	650	560	460
Об'єм твердої деревини, %	43,4	37,4	30,7
Об'єм порожнеч, %	56,6	62,6	69,3

Деревина складається із суміші значної кількості речовин різноманітної будови, яка має різноманітні властивості. Основними

компонентами деревини є геміцелюлози, целюлоза та лігнін [49]. *Геміцелюлози* являють собою суміш низькомолекулярних сахаридів: пентозанів ( $C_5H_8O_5$ ), гексозанів ( $C_6H_{10}O_6$ ) та їх похідних у вигляді п'яти- та шести вуглецевих карбонових кислот, лактонів тощо. *Целюлоза* являє собою високомолекулярний полісахарид  $(C_6H_{10}O_5)_m$ . *Лігнін* у своєму складі має здебільшого ароматичні молекули.

Середнє значення розглянутих компонентів в деревині складає: геміцелюлоз 25%, целюлози 50%, лігнінів 25%. Склад елементів деревини в середньому можна представити так: вуглець 50%, водень 6%, кисень 44%.

Горіння деревини істотно відрізняється від горіння рідин і газів і може протікати відразу в декількох режимах - гомогенному і гетерогенному [66]. Тому при горінні деревини можна виділити дві фази: 1) гомогенне (тобто полум'яне) горіння газоподібних продуктів розкладання; 2) гетерогенне горіння твердого вуглеродистого залишку, що утворився.

При нагріванні деревини до температури 120...150°C завершується виділення з її порожнин фізичної води, тобто закінчується процес сушки. При подальшому нагріванні до температури 150...180°C виділяються залишки капілярної води і починає виділяються вода, яка хімічно пов'язана, а також починає розклад найменш стійких компонентів: похідні геміцелюлоз, тобто низькомолекулярні кислоти з виділенням  $CO_2$  і  $H_2O$ .

При подальшому нагріванні до температури, близької до 250°C, починається в основному піроліз деревини (головним чином геміцелюлоз) із виділенням газів  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ . Виділена суміш газів готова до спалаху від джерела запалювання. Температуру 250°C приймають за температуру спалаху деревини. Подальше зростання температури до 280...300°C призводить до інтенсивного розкладу геміцелюлоз, а при 350...450°C виконується інтенсивний піроліз головної складової деревини – целюлози і піроліз найбільш стійкої компоненти – лігнінів. При подальшому нагріванні до температури 500...550°C швидкість виділення газоподібних речовин зменшується в основному за рахунок вже виділених всіх летючих. При

температурі, близької до 600°C, розклад деревини на газоподібні продукти та вуглецевий залишок завершується.

Для того, щоб деревина спалахнула, необхідно прогріти її поверхню до температури 290...300 °С, при якій би вистачало тепла на прогрів і піроліз. Стадія полум'яного горіння займає більш короткий проміжок часу, але при цьому виділяється близько 55—60% всієї енергії. Процес термічних перетворень целюлози, де нагрівання зумовлено зовнішнім джерелом або зворотним тепловим потоком продуктів горіння матеріалів, наведено на рис. 1.8 [66]. Швидкість гетерогенного горіння визначається швидкістю надходження повітря до поверхні.

Процес горіння деревини складається з двох основних періодів: горіння парів й газів, що утворюються при її розкладанні; горіння вугілля, що утворилося. Між зазначеними періодами є перехідний етап, що характеризується перебігом обох процесів.



Рис. 1.8. Процес термічних перетворень целюлози

В умовах пожежі більше значення має перший період, оскільки він супроводжується виходом основної маси нагрітих до високої температури

летких горючих продуктів, на які припадає до 80% теплоти згоряння деревини. Частина цього тепла акумулюється «свіжою» поверхнею матеріалу, ініціює процес самостійного горіння.

### **1.5.2. Пожежна небезпека деревини та її виробничих відходів**

Деревообробні цехи, в яких виконуються технологічні процеси оброблення деревини для виготовлення виробів, мають в своєму складі відповідні пожежонебезпечні зони. Процес обробки деревини виконується на відповідних деревообробних верстатах, які працюють з використанням електродвигунів. Згідно із ДНАОП 0.00 – 1.32.01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» в деревообробному цеху виділяють пожежонебезпечні та вибухонебезпечні зони [228].

В деревообробних цехах виділяють дві пожежонебезпечні зони: 1) пожежонебезпечна зона класу П-I – простір у приміщенні, у якому знаходиться горюча рідина, що має температуру спалаху, більшу за +61°C (лако-фарбувальні відділення); 2) пожежонебезпечна зона класу П-II – простір у приміщенні, у якому можуть накопичуватися і виділятися горючий пил або волокна з нижньою концентраційною межею спалахування, більшою за 65 г/м<sup>3</sup> (всі відділення цеху, в яких виконується механічна обробка деревини).

Розглянемо пожежонебезпечні зони класу П-II, які займають в цехах 92...96% загальної виробничої площі. В процесі механічної обробки деревини виділяється пил, який є пожежонебезпечним у стані аерогелю з нижньою концентраційною межею більшою за 65 г/м<sup>3</sup> і температурою спалаху вище 250°C. У залежності від середнього розміру часток пил може довгостроково знаходитися в зваженому стані або відразу ж осідати після короткочасного переходу в зважений стан. Дисперсна система, що представляє собою пил, зважений у повітрі, називається *аерозолем*. Осілий

пил називається *аерогелем*. Крім цього, на цих зонах розміщуються відходи механічної обробки (стружка, тирса тощо) та заготовки і вироби із деревини (тверді горючі матеріали).

Аерозолі по своїм властивостям займають проміжне положення між аерогелем і гомогенною газоповітряною сумішшю. Так як і аерогелі є гетерогенними дисперсними системами з однаковою твердою фазою, і поведіння їх визначається фізико-хімічними властивостями цієї твердої фази. З газоповітряними сумішами аерозолі подібні тим, що горіння більшості з них протікає з вибухом і характеризуються вони багатьма параметрами, типовими для газових сумішей. Із властивостей пилу, що визначають їхню пожежну небезпеку, найбільш важливими є: дисперсність, хімічна активність, адсорбційна здатність, схильність до електризації [99].

У цілому горіння аерогелю в осілому стані багато в чому нагадує горіння твердого горючого матеріалу, з якого цей пил отриманий. Відмінною рисою аерогелю є його здатність переходити в зважений стан. При нагріванні протікають усі підготовчі процеси, характерні для твердих горючих матеріалів, однак швидкість їхнього протікання вище, що пояснюється розвитком поверхнею, підвищеною хімічною активністю, зниженою теплопровідністю матеріалу в результаті здрібнювання, збільшеною адсорбційною здатністю пилу. Це обумовлює менший період індукції запалення, велику швидкість поширення горіння, а також підвищену схильність до самозаймання в порівнянні з вихідним матеріалом, з якого пил отриманий.

Окисні процеси протікають одночасно як на поверхні пилового шару, так і в його глибині. При цьому в реакції бере участь кисень, адсорбований на поверхні матеріалу. Швидкість протікання процесів окислювання під шаром горючого пилу на порядок нижче, ніж на поверхні, у результаті горіння в товщі пилового відкладення може перейти в режим *тління*. Тліючий пил становить велику небезпеку, оскільки 1) горючі продукти розкладання, що виділяються, можуть накопичуватися в закритих об'ємах, і

горіння з дифузійного може перейти в кінетичне; 2) навіть при слабкому струшуванні (завихренні) тліюча маса може samozапалитися через різкий приплив кисню і викликати вибух завихреного пилю [99].

Аерозолі запалюються і горять аналогічно газоповітряним сумішам. Тому їхня пожежна небезпека характеризується такими ж параметрами, як і газоповітряні суміші. Схильність аерозолей до коагуляції (злипання) і осадженню істотно відрізняє їх від газоповітряних сумішей. Якщо поширення полум'я в газових сумішах обумовлено прогрівом холодної суміші за рахунок теплопровідності, то поширення полум'я в пилоповітряних сумішах відбувається за рахунок прогріву холодної суміші випромінюванням, що випускається фронтом полум'я.

На підставі розглянутих пожежонебезпечних чинників приміщення цехів деревообробних підприємств відносять до категорії В із характеристикою їх як пожежонебезпечні внаслідок наявності в цих приміщеннях горючого пилю, що утворює пилоповітряні суміші, а також внаслідок наявності відходів механічної обробки та твердих горючих матеріалів [174].

### **1.5.3. Моделі тепломасообміну при пожежі в приміщенні цеху**

Пожежа в приміщенні деревообробного цеху є дуже складною, до кінця не вивченою, не стаціонарною із тривимірним теплофізичним процесом, який супроводжується зміною хімічного складу та чинників газового середовища приміщення. Головними складовими тепломасообміну при пожежі згідно із даними роботи [14] є:

- на половині висоти приміщення різниця тиску в різних його зонах не перевищує десятих долів проценту від значення атмосферного тиску;
- швидкості часток диму та газів дуже невеликі по відношенню до швидкості звуку, що відповідає їх невеликим силам інерції;



– тепловиділення хімічних реакцій горіння визначає температурний режим приміщення;

– в приміщенні потрібно враховувати процеси турбулентної дифузії внаслідок великих швидкостей дифузії.

Для розрахунку тепломасообміну при пожежі в приміщенні використовують головним чином три групи методів [14]: 1) інтегральні моделі; 2) зонні моделі; 3) диференціальні (польові) моделі. Наведені моделі відрізняються між собою різними рівнями представлення фізичної суті пожежі.

*Інтегральні моделі* [14], які представляються звичайними диференціальними рівняннями, дозволяють визначати необхідні параметри у вигляді середньооб'ємних величин тиску, температури, густини, масової концентрації токсичних продуктів горіння і кисню, оптичної густини диму, температурних полів в огорожуючих конструкціях від часу тощо.

Аналіз інтегральних моделей для розгляду тепломасообміну при пожежі в приміщенні показав, що вони мають деякі недоліки:

– не враховується розміщення отвору для виходу газів із зони пожежі і пожежного навантаження відносно огорожуючи конструкцій;

– емпіричні залежності для розрахунку сумарних теплових потоків в огорожуючі конструкції наведені тільки для двох матеріалів цих конструкцій: бетон або цегла [14, 135];

– емпіричні залежності для розрахунку сумарних теплових потоків в огорожуючі конструкції наведені тільки для випадку горіння твердих горючих матеріалів [14, 135];

– масова швидкість газифікації пожежного навантаження представлено у вигляді емпіричного співвідношення [14, 135].

Не зважаючи на вказані недоліки інтегральні моделі мають перевагу у можливості виконання на комп'ютері швидкого дослідження динаміки розвитку небезпечних чинників пожежі для конкретного приміщення з достатньою достовірністю цього прогнозу. Тому ці моделі доцільно

використовувати для комплексного дослідження динаміки розвитку небезпечних чинників пожежі.

Стосовно використання інтегральних моделей для розгляду тепломасообміну при пожежі в приміщеннях деревообробних цехів в науковій і технічній літературі не наведено.

*Зонні моделі* [14, 268, 83] дозволяють зменшити або зовсім усунути вплив на точність розрахунку деякі недоліки, які мають місце в інтегральних моделях. Це досягається за рахунок розбиття приміщення на окремі зони, в яких різниця між параметрами газового середовища була б мінімальною. В кожній з цих зон для отримання необхідних параметрів використовують інтегральні моделі. В цьому випадку використовують більшу кількість звичайних диференціальних рівнянь, які утворюють замкнену систему. Розв'язок таких рівнянь в більшості випадків виконують чисельними методами, наприклад, методом типу Рунге-Кутта.

Приклади розв'язку задач з використанням зонних моделей розглянуто для спрощених випадків і зовсім не використовувалися для прогнозування параметрів пожежі для деревообробних цехів [14].

*Диференціальні (польові) моделі* дозволяють більш детально описувати процеси тепломасообміну при пожежі в приміщенні. Розробкою детерміністичних математичних моделей пожеж займаються спеціалісти в різних країнах світу. Наприклад, при центрі пожежних досліджень національного бюро стандартів США розробили прецизійну диференціальну модель процесів пожежі, яка є еталоном і базою для порівняння та перевірки більш простих моделей. Ця робота розпочалася у 80-х роках минулого століття [256, 299]. В США в м. Нотр Дам в університеті була розроблена дво- і тривимірні моделі під назвою UNDSAFE для прогнозування динаміки пожеж в приміщеннях [301].

Аналогічні роботи по розробленню подібних програм були виконані в Великобританії. Так, фірмою CHAM LTD разом із дослідною пожежною станцією були розроблені дво- і тривимірні моделі пожеж JASMINE і

відповідне програмне забезпечення для прогнозування розвитку пожеж [257 – 290]. Крім цього, в Великобританії був розроблений програмний комплекс SOFIE для моделювання пожеж в приміщеннях [283].

Тривимірні диференціальні моделі використовуються в Японії для прогнозування розповсюдження небезпечних факторів пожежі в атриумах будинків [293] та двовірні – для моделювання, наприклад, розповсюдження пожежі в шестиповерховому блоці приміщення [302]. В Росії розроблені і використовуються дво- і тривимірні диференціальні моделі тепломасообміну при пожежі [14, 218, 209, 298, 199], за допомогою яких прогнозують динаміку пожеж та її небезпечних чинників.

Найбільш детально розглянута методологія розроблення основних рівнянь диференціальної (польової) моделі тепломасообміну при пожежі в роботі [198]. Така польова модель включає в себе рівняння, які виражають фундаментальні закони фізики: закони збереження маси, імпульсу та енергії. Структура польової моделі зображена на рис. 1.9.

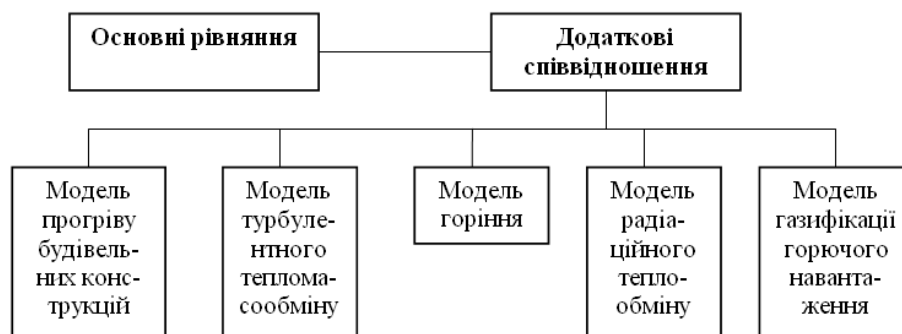


Рис. 1.9. Структура польової моделі [198]

Основними рівняннями польової моделі є:

– рівняння нерозривності газової суміші, яке є математичним виразом закону збереження маси газової суміші;

– рівняння руху, для якого основою є векторне рівняння у скалярному вигляді закону збереження імпульсу для суміші газів та яке розпадається на три рівняння руху вздовж координатних осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;

- рівняння енергії, яке є математичним виразом закону збереження та перетворення енергії;
- рівняння нерозривності для компонентів газової суміші;
- рівняння закону збереження оптичної густини диму;
- закон збереження маси горючого матеріалу;
- рівняння стану сумішу ідеальних газів;
- рівняння теплофізичних параметрів суміші.

Всі диференціальні рівняння приводяться до «стандартного» виду, зручному для чисельного розв'язку

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho w\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S, \quad (1.1)$$

де  $\Phi$  – залежна змінна (ентальпії газової суміші і матеріалу стін та перекриття, проекції швидкості на координатні осі, концентрації компонентів газової суміші, кінетична енергія турбулентності і швидкість її дисипації, масова концентрація і оптична густина диму);

$\Gamma$  – коефіцієнт дифузії для  $\Phi$ ;

$S$  – джерельний член для  $\Phi$ .

Значення величин в залежності (1.1) наведені в роботі [198, табл. 2.1]

Результати розгляду та аналізу наведених моделей показали, що вони використовувалися головним чином для аналізу пожеж в приміщеннях житлових будівель, торгівельно-розважальних центрів, атріумів тощо. Зовсім не підлягали розгляду питання прогнозування тепломасообміну при пожежі в приміщеннях деревообробних цехів з визначенням критичного часу пожежі для різних можливих ситуацій. Для розгляду пожежних ситуацій в деревообробних цехах найбільш доцільно використовувати польову модель з програмним забезпеченням FDS, яка удосконалена і рекомендована роботою [199] для розгляду пожежних ситуацій в приміщеннях.

#### 1.5.4. Моделі пожеж для відкритих складів лісоматеріалів

Найбільш небезпечними пожежами є пожежі на відкритих складах пиломатеріалів. Такі пожежі в більшості випадків мають вигляд масової пожежі. Перша робота стосовно розвитку та поширенню пожеж на відкритих складах пиломатеріалів була розглянута на 10-му Симпозіуму по процесах горіння на пожежах в 1965 році в м. Піттсбург (США) за результатами досліджень [238]. Механізм поширення пожежі був представлений у вигляді розповсюдження іскор і головешок, що горять, які розлітаються під дією конвективної колонки, що утворюється над осередком пожежі. Вивчення пожеж і способів їх гасіння на відкритих складах лісоматеріалів було розпочато, наприклад, в Росії в 50 - 60 роки минулого століття з використанням результатів експериментальних досліджень на натурних об'єктах. Узагальнення цих результатів було опубліковано в роботах [139, 140].

За результатами робіт П.П. Девлишева та І.О. Іванова [74, 91] були отримані емпіричні залежності для визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі по штабелях на складах пиломатеріалів. Але ці залежності неможливо використовувати для розрахунку швидкості розповсюдження фронту пожежі по території складу пиломатеріалів, тому що вони не враховують протипожежних розривів між штабелями. При розгляді процесу розповсюдження пожежі по території складу пиломатеріалів враховують теплове випромінювання та вплив вітру на швидкість розповсюдження фронту пожежі, а також положення факела полум'я в просторі, тобто на його кут нахилу відносно вертикальної осі. Крім цього, враховують перекидання вітром іскор і головешок, що горять, на деревину сусіднього штабеля, які також сприяють поширенню пожежі [133]. При перекиданні іскор на попередньо прогріту поверхню штабеля за рахунок теплового випромінювання зменшується тривалість її спалаху. Для врахування сумісної дії теплового випромінювання і перенесених іскор на займання штабеля

лісоматеріалів була запропонована імовірносно-множинна модель [11, 70]. Виходячи з цієї моделі процес розповсюдження пожежі на лісоскладі можна представити як сукупний розвиток об'єктів, які розміщені на площині.

Методи математичного моделювання розвитку пожеж на складах лісоматеріалів почали розвиватися у 80-х роках минулого століття в Росії (ВНДПО). При цьому розглядалися питання, які пов'язані з розповсюдженням пожежі з урахуванням протипожежних і технологічних розривів між штабелями та за рахунок випромінювання тепла, конвекції, переносу іскор і головешок, що горять, а також рухаючих вогневих вихорів. Всі наведені процеси в сукупності впливають на динаміку пожежі на складах лісоматеріалів. Заслуговує уваги математична модель для визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі на складах круглого лісу з використанням множинно-рекуррентного рівняння для опису стану пожежі на лісоскладі  $\Omega$ , яке зв'язує поточне і наступне положення фронту з полем випадкових кінцевих множин локального розповсюдження в різних напрямках [134]. В цьому випадку

$$\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \Omega_4 \cup \Omega_5 \cup \Omega_6 \cup \Omega_7 \cup \Omega_8, \quad (1.2)$$

де  $\Omega_1$  – границя лісоскладу;

$\Omega_2$  – штабелі лісоматеріалів;

$\Omega_3 \dots \Omega_8$  – технологічні і протипожежні розриви.

У відповідності із картою однорідності  $\Omega$  для кожної  $\Omega_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ) визначають імовірності розповсюдження пожежі  $f(x)$  та імовірність спалаху  $g(y)$ .

Недоліком цієї моделі є те, що набір імовірностей для прогнозування розвитку пожежі можна визначити тільки з використанням результатів експерименту, використавши середньомірну ідентифікацію розвитку пожежі.

Розвиток пожежі на складах лісоматеріалів головним чином виконується за рахунок передачі тепла від штабеля до штабеля тепловим

випромінюванням. В роботі [1] розглянуто передачу тепла випромінюванням від факелу полум'я над резервуаром при пожежі в резервуарному парку. При цьому використовувалася залежність Стефана-Больцмана для визначення густини теплового потоку від резервуара, який охоплений пожежею, до сусіднього

$$\frac{dQ_{ij}}{dt} = c_0 \varepsilon_i \varepsilon_j \left( \left( \frac{T_i}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_j}{100} \right)^4 \right) H_{ij}, \quad (1.3)$$

де  $c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ ;

$\varepsilon_i, \varepsilon_j$  – ступінь чорноти тіл  $i, j$ ;

$H_{ij}$  – взаємна площа опромінення між тілами;

$T_i, T_j$  – температура тіла, яке випромінює тепло, і тіла, яке сприймає тепловий потік, відповідно.

Авторами роботи встановлено, що кількість тепла, переданого випромінюванням, на 4 порядки перевершує кількість тепла, переданого теплопровідністю і конвекцією, що дозволяє розглядати передачу тепла від факела полум'я тільки випромінюванням.

Автори робіт [39, 90] при розгляді лісових пожеж встановили, що на швидкість розповсюдження крайки ландшафтної пожежі впливає приземний вітер. Для адекватного прогнозування динаміки розповсюдження пожежі необхідно мати знати значення сили і напрямлення вітру в кожній точці поверхні рельєфу. На підставі даних метеостанцій в роботі [21] запропонована модель інтерполяції цих даних для швидкості вітру на всю розрахункову область по горизонталі. Поле вітру на розрахунковій області знаходиться на підставі розв'язку рівняння Лапласа для потенціалу вітру.

В роботі [21] отримана двомірна модель радіальної швидкості  $V_w(\varphi)$  розповсюдження крайки пожежі в азимутальному напрямку  $\varphi$  під дією ізольованого вітру

$$V_w(\varphi) = (V_0 + kv_w)k_w, \quad (1.4)$$

де  $k_w$  – безрозмірний годограф радіус-вектора швидкості крайки пожежі під впливом вітру

$$k_w = \frac{2\beta \cos \varphi + (1 + \beta^2)\sqrt{\cos^2 \varphi + (1 - \beta^2)^2 \sin^2 \varphi}}{\cos^2 \varphi + (1 + \beta^2)^2 \sin^2 \varphi}; \quad (1.5)$$

$k$  – табульований коефіцієнт, який враховує роздувний вплив полум'я;

$v_w$  – швидкість вітру за даними метеостанції, м/хв;

$\beta$  – коефіцієнт, який враховує питому теплоємність горючих матеріалів на швидкість вітру

$$\beta = \frac{v_w}{\sqrt{v_w^2 + c^2}}; \quad (1.6)$$

$c$  – табульований коефіцієнт, який враховує питому теплоємність горючих;

$\varphi$  – полярний кут (полярна вісь співпадає з напрямом вітру).

Розглянута модель може використовуватися в діапазоні  $0 \leq v_w \leq 8$  м/хв. Необхідно відзначити, що в роботі [21] достатньо не розглянуто області використання моделі. Стосовно розповсюдження пожеж на лісоскладах наведена модель не враховує тривалість переходу пожежі від одного штабеля до іншого, що не дає можливості її використання.

Опис математичних моделей стосовно динаміки пожеж виконано у вигляді огляду та їх програмного забезпечення в роботах [81, 82, 303, 90].

Для розроблення моделі динаміки контуру лісової пожежі в роботах [222, 95, 96] був використаний аналітичний підхід. Недоліком розроблених моделей є використання полярної системи координат, яка не дозволяє задавати складний контур пожежі. Крім цього, розроблені моделі мають жорстку прив'язку до полюса, координати якого невідомі.

В роботах [131, 132, 184] для побудови контуру пожежі використовують ітераційні процедури з дискретним часовим кроком. Для



цього використовують годограф вектор-функції щільного розміщення, а контури вогнища і пірологічних об'єктів задають ломаною лінією. Ця модель дозволяє вельми схематично отримати динаміку контуру пожежі, що не дозволяє її практичного застосування.

З іншої точки зору на лісоскладах пожежа в більшості випадків виникає на конкретному штабелі і розвивається в певному напрямку з урахуванням напрямку вітру та протипожежних і технологічних розривів між штабелями. Тому використання розглянутих моделей в роботах [222, 95, 96, 131, 132, 184] для прогнозування динаміки пожежі на лісоскладах зовсім недоцільно.

#### **1.5.5. Обмеження розповсюдження пожежі на деревообробних підприємствах**

Деревообробні підприємства за призначенням до свого складу включають: 1) деревообробні цехи (лісопильні, столярно-меблеві, складальні, клеєних матеріалів і деревно-волокнистих плит тощо); 2) відкриті склади лісоматеріалів. Розглянемо основні обмеження розповсюдження пожежі для цих підприємств.

*Деревообробні цехи* для обмеження розповсюдження виниклої пожежі повинні бути забезпечені системами протипожежного захисту (СПЗ):

- системами пожежної сигналізації;
- автоматичними системами пожежогасіння;
- автономними системами пожежогасіння локального застосування;
- системами оповіщення про пожежу та управління евакуюванням людей;
- системами протидимного захисту;
- пожежними відсіками;
- системами диспетчеризації СПЗ;
- протипожежними дверима, клапанами, воротами, завісами (екранами).

*Системи пожежної сигналізації (СПС)* призначені для раннього виявлення пожежі та подавання сигналу тривоги для вживання необхідних заходів, які пов'язані з евакуюванням людей, викликом пожежно-рятувальних підрозділів, запуском протидимних систем, пожежогасінням, здійсненням управління протипожежними клапанами, дверима, воротами та завісами (екранами), відключенням або блокуванням (розблокуванням) інших інженерних систем та устаткування при сигналі «пожежа» [72].

Компоненти систем пожежної сигналізації повинні відповідати вимогам серії стандартів ДСТУ EN 54 (усі частини розділу 2). При виборі пожежних сповіщувачів необхідно керуватися вимогами ДСТУ-Н CEN/TS 54-14. Пожежні сповіщувачі рекомендується розташовувати за схемами трикутного (рис. 1.10) або квадратного розміщення (рис. 1.11) [72].

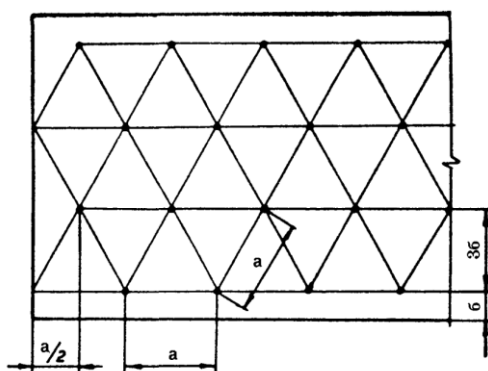


Рис. 1.10. Схема трикутного розміщення сповіщувачів

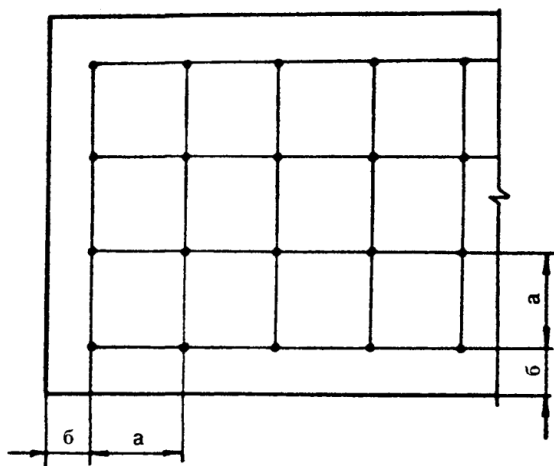


Рис. 1.11. Схема квадратного розміщення сповіщувачів

Максимальна відстань між тепловими пожежними сповіщувачами, сповіщувачами і стіною, визначаються за даними табл. 1.2.

Максимальна відстань між димовими пожежними сповіщувачами, сповіщувачем і стіною визначаються за даними табл. 1.3. Наявність пожежних сповіщувачів не виключає обладнання об'єктів мовленнєвою системою оповіщення про пожежу. Пожежні сповіщувачі повинні використовуватися згідно з вимогами експлуатаційних документів та з урахуванням середовища контрольованих приміщень.

Таблиця 1.2

Максимальна відстань між тепловими пожежними сповіщувачами, сповіщувачами і стіною [72]

Висота приміщення, що захищається, м	Схема квадратного розміщення сповіщувачів		Схема трикутного розміщення сповіщувачів	
	Максимальна відстань, м	Максимальна відстань, м	Максимальна відстань, м	Максимальна відстань, м
До 8,0	між сповіщувачами, а, м	від сповіщувача до стіни, б, м	між сповіщувачами, а, м	від сповіщувача до стіни, б, м
Понад 8,0 до 11,0	7,0	3,5	8,6	2,5
	Див. примітку 2	Див. примітку 2	Див. примітку 2	Див. примітку 2

**Примітка. 1.** Відстані а і б - за рис. 1.10 та 1.11.

**Примітка. 2.** Зазвичай за цих висот не застосовують , проте в окремих випадках використання допускають.

*Автоматичні системи пожежогасіння (АСПГ)* включають: спринклерні та дренчерні установки; системи порошкового, газового та аерозольного пожежогасіння [4, 5]. Вибирати АСПГ слід з урахуванням характерних небезпечних факторів можливої пожежі, а також впливу вогнегасної речовини на довкілля та людей [72]. АСПГ, окрім спринклерних, повинні оснащуватись ручним пуском. Автоматичний пуск АСПГ повинен

відбуватися при спрацюванні двох пожежних сповіщувачів або двох технологічних давачів.

Таблиця 1.3

Висота приміщення, що захищається, м	Максимальна відстань між димовими пожежними сповіщувачами, сповіщувачем і стіною [72]		Схема трикутного розміщення сповіщувачів	
	Схема квадратного розміщення сповіщувачів		Схема трикутного розміщення сповіщувачів	
	Максимальна відстань, м між сповіщувачам и, а, м	Максимальна відстань, м від сповіщувача до стіни, б, м	Максимальна відстань, м між сповіщувачами, а, м	Максимальна відстань, м від сповіщувача до стіни, б, м
До 11,0	10,5	5,3	13	3,75
Понад 11,0 до 25,0	Див. примітку 2	Див. примітку 2	Див. примітку 2	Див. примітку 2

**Примітка. 1.** Відстані а і б - за рис. 1.10 та 1.11.

**Примітка. 2.** Зазвичай за цих висот не застосовують, проте в окремих випадках використання допускають.

Для захисту окремих пожежонебезпечних ділянок, які згідно з будівельними нормами не підлягають обов'язковому оснащенню автоматичними системами пожежогасіння, можуть застосовуватись автономні системи пожежогасіння локального застосування.

Газові вогнегасні речовини, що використовуються в АСПГ, повинні відповідати вимогам ДСТУ 3958, ДСТУ 4466, ДСТУ 5092, ДСТУ 7288.

*Системи оповіщення про пожежу та управління евакуюванням людей (СО)* призначені для оповіщення людей, що знаходяться в приміщенні цеху, про виникнення пожежі з метою створення умов для їх своєчасного евакуювання [214, 173]. Оповіщення здійснюється одним із таких способів або їх комбінацією [72]:

- передачею звукових, а також, за необхідності, світлових сигналів оповіщення у всі приміщення цеху;
- трансляцією мовленнєвих повідомлень про пожежу;

- передачею в окремі зони приміщення повідомлень про місце виникнення пожежі, про шляхи евакуювання та дії, що забезпечують особисту безпеку;

- увімкненням світлових покажчиків рекомендованого напрямку евакуювання;

- увімкненням освітлення евакуювання.

За способами оповіщення СО діляться на світлові (візуальні), звукові, мовленнєві та комбіновані. Приведення в дію СО виконується:

- в автоматичному режимі сигналом від СПС;

- в ручному режимі оперативним персоналом із пожежного поста при отриманні сигналу від СПС або АСПГ (ручний режим має найвищий пріоритет управління СО).

Визначення зон оповіщення ведеться за наступними показниками:

- особливістю пожежної небезпеки та архітектурно-планувальних рішень приміщення цеху;

- можливими шляхами поширення небезпечних факторів пожежі;

- умовами та шляхами евакуювання людей.

Настінні звукові *оповіщувачі* та *гучномовці* необхідно встановлювати так, щоб відстань між верхньою частиною оповіщувача і рівнем підлоги була не менше 2,2 м, а відстань між верхньою частиною оповіщувача та рівнем стелі була не менше 0,15 м [72].

СО з використанням світлової (візуальної) сигналізації складається із *світлових оповіщувачів, світлових покажчиків, знаків, табло* або інших пристроїв, сигнальна інформація від яких створюється подачею сигналу управління. При цьому світлові (візуальні) системи оповіщення застосовуються у разі неможливості забезпечити оповіщення звуковими та мовленнєвими оповіщувачами [72].

*Системи протидимного захисту (СПДЗ)* – це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, які спрямовані на запобігання впливу на людей диму, підвищеної температури і токсичних продуктів горіння [188]. Системи

протидимного захисту передбачають з метою досягнення однієї або декількох таких цілей:

- забезпечення умов для безпечного евакуювання людей;
- забезпечення умов для гасіння пожежі та проведення пожежно-рятувальних робіт;
- зниження ймовірності займання предметів, обладнання, речовин і матеріалів під впливом теплового випромінювання;
- зниження впливу високих температур на конструкції будинку під час пожежі;
- зменшення збитків від продуктів термічного розкладу та гарячих газів.

Площа, що обслуговується одним димоприймальним пристроєм, не повинна перевищувати 900 м<sup>2</sup>. Приміщення площею більше ніж 1600 м<sup>2</sup> необхідно поділяти на димові зони виходячи з можливості виникнення пожежі в одній з них. Площа димової зони не повинна перевищувати 1600 м<sup>2</sup>. Кожну димову зону слід вигороджувати будівельними конструкціями або щільними вертикальними завісами з негорючих матеріалів, які опускаються зі стелі (перекриття) на підлогу, але не нижче ніж 2,5 м від підлоги, утворюючи під стелею (перекриттям) резервуари диму [161].

*Пожежні відсіки* – це частина будівлі, яка виділяється протипожежними перешкодами (стінами, зонами, переkritтями) з метою обмеження можливої площі пожежі та забезпечення умов для її ліквідації. Виконання пожежних відсіків обумовлено великими розмірами сучасних виробничих і цивільних будівель, в яких знаходяться значні матеріальні цінності із горючих матеріалів, особливо на деревообробних підприємствах, що може призвести при відсутності пожежних відсіків до значних матеріальних збитків від пожежі [89, 167, 196, 193, 194].

*Системи диспетчеризації* виконують управління системами протипожежного захисту, автоматизацію та електрокерування їх роботою,

забезпечують контроль цих систем і сигналізацію. Для цього обладнують центральний пункт управління (ЦПУ).

ЦПУ СПЗ повинен забезпечувати [72, 178, 190]:

а) інтеграцію автоматичних систем протипожежного захисту і систем та устаткування, що не входять до складу СПЗ, але пов'язані із забезпеченням безпеки людей на об'єкті при виникненні пожежі;

б) графічне та текстове відображення інформації стану та зміни режимів роботи систем СПЗ і систем та устаткування, що не входять до складу СПЗ, але пов'язані із забезпеченням безпеки людей на об'єкті при виникненні пожежі, згідно з переліком обов'язкових вимог;

в) дистанційне управління та моніторинг щодо всіх необхідних функцій СПЗ і систем та устаткування, що не входять до складу СПЗ, але пов'язані із забезпеченням безпеки людей на об'єкті при виникненні пожежі, тільки через застосовані на об'єкті прийнятно-контрольні пожежні прилади та обладнання СПЗ;

г) документування і реєстрування усіх подій та ситуацій, які виникають в СПЗ.

*Протипожежні двері, клапани, ворота, завіси (екрани) [72].*

У приміщенні пожежного поста про нормальне функціонування протипожежних дверей, клапанів, воріт, завісів (екранів) повинна бути така інформація:

1) світлова сигналізація (з розшифруванням розташування протипожежних перешкод):

а) про наявність напруги на вводах електропостачання;

б) про відсутність несправностей;

в) про готовність до роботи пристроїв управління (наявність напруги, справність акумуляторів, відсутність несправностей);

г) про зачинений стан при пожежі (з розшифруванням розташування).

**Примітка:** Якщо двері, ворота та завіси утримуються в черговому положенні за допомогою електроприводу, а за відсутності напруги електроживлення переходить у робоче положення, вимога переліку а) - не є обов'язковою.

## 2) звукова сигналізація про несправність.

Після розгляду та аналізу систем протипожежного захисту деревообробних цехів з метою обмеження розповсюдження виниклої пожежі можна зробити наступні висновки:

- існуючі системи протипожежного захисту дійсно забезпечують обмеження розповсюдженню пожежі, яка може виникнути в деревообробному цеху;
- не розглядаються методи для визначення складу систем протипожежного захисту виходячи з конкретних існуючих умов кожного деревообробного цеху;
- відсутні методики для визначення потрібної кількості визначених систем протипожежного захисту;
- відсутній критерій для оцінки забезпеченості деревообробного цеху системами протипожежного захисту на випадок виникнення пожежі для її оперативної ліквідації;
- відсутня методологія прогнозування забезпеченості деревообробного цеху системами протипожежного захисту при проведенні аудиту пожежної безпеки;
- відсутня методологія оперативного визначення сил і засобів для ліквідації пожежі в деревообробному цеху з використанням інформаційних технологій.

**Склади лісоматеріалів** для обмеження розповсюдження пожежі повинні обладнуватися: 1) пожежною сигналізацією; 2) протипожежним водопостачанням; 3) пожежною технікою з урахуванням протипожежних заходів.

**Пожежна сигналізація.** На території відкритих складів лісоматеріалів необхідно встановлювати адресну електричну пожежну сигналізацію з



ручними пожежними сповіщувачами, наприклад, типу СПР «Тірас» [52, 191, 224]. Ручні пожежні сповіщувачі слід встановлювати на протипожежних розривах між окремими групами штабелів, кварталами і ділянками на відстані не більше 100 м один від одного, на негорючих опорах і на висоті 1,35 м від землі. Приймально-контрольні прилади пожежної сигналізації повинні встановлюватися в приміщеннях чергового персоналу складу. Сповіщення людей про пожежу на території відкритих складів — по гучномовному розпорядливо-пошуковому диспетчерському зв'язку та звуковій сигналізації (сирени, дзвони і так далі).

*Протипожежне водопостачання.* На відкритих складах лісоматеріалів із сумарною місткістю до 10000 щільних м<sup>3</sup> слід передбачати протипожежний водопровід низького тиску, а понад 10000 щільних м<sup>3</sup> лісоматеріалів — протипожежний водопровід високого тиску. Тривалість гасіння пожеж слід приймати не менше 5 г для відкритих складів лісоматеріалів. Витрата води на зовнішнє гасіння пожеж відкритих складів лісоматеріалів на одну пожежу слід приймати не менше величин, вказаних в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Розхід води на гасіння пожежі [52]

Вид і спосіб зберігання лісоматеріалів	Витрата води на гасіння пожежі, л/с, при сумарній місткості складів лісоматеріалів, щільних м <sup>3</sup>			
	до 10000	більше 10000 до 100000	більше 100000 до 500000	більше 500000
Відкриті склади:				
пилотеріали в штабелях	60	120	150	180
круглі лісоматеріали в штабелях	60	90	120	150
балансова деревина, осмолення і дрова в купах	90	120	180	240
тріска і тирса в купах	30	60	90	120
відходи деревини в купах	30	60	90	120

У насосній станції слід передбачати один резервний насосний агрегат незалежно від кількості робочих насосних агрегатів. Насосні станції слід

розміщувати на відстані не менше 40 м від штабелів і куп лісоматеріалів, у будівлях, що окремо стоять, або прибудовах, відокремлених від інших приміщень протипожежними перегородками 1-го типу і перекриттями 3-го типу і що мають безпосередній вихід назовні. Пожежні гідранти на водопровідній мережі слід встановлювати на відстані не більше 100 м один від одного. Відстань від пожежних гідрантів до штабелів і куп відкритого зберігання повинна бути не менше 8 м і не більше 25 м.

Кількість всмоктувальних ліній до насосної станції та напірних ліній від насосної станції до мережі протипожежного водопроводу повинно бути не менше двох. Насосні станції слід розміщувати на відстані не менше 40 м від штабелів і куп лісоматеріалів, в окремих будинках чи прибудовах, а також у приміщеннях будинків на перших, в цокольних і підвальних поверхах, відокремлених від інших приміщень протипожежними перемичками 1-го типу та перекриттями третього типу і мають безпосередній вихід назовні. Насосні станції належить, як правило, передбачати з керуванням без обслуговуючого персоналу: автоматичним, дистанційним з приміщення чергового персоналу з періодичним приходом у приміщення насосної станції обслуговуючого персоналу.

*Обмеження розповсюдження пожежі пожежною технікою з урахуванням протипожежних заходів.* Інтенсивність подачі вогнегасних речовин на поверхню штабелів відкритих складів лісоматеріалів при гасінні пожежі слід приймати не менше величин, зазначених у табл. 1.5.

Витрати води на зовнішнє пожежогасіння відкритих складів лісоматеріалів слід приймати за даними табл. 1.4. Стаціонарні лафетні установки слід передбачати при витраті води на зовнішнє пожежогасіння понад 90 л/с. Розрахункова витрата води на кожен стаціонарний лафетний ствол типу ЛС-60 слід приймати не менше 60 л/с при тиску в насадці ствола 0,5 МПа.

Число і розміщення стаціонарних лафетних стволів, як правило, слід визначати з умови зрошення кожної точки штабеля або купи лісоматеріалів

не менше ніж двома суцільними струменями.

Таблиця 1.5

Інтенсивність подачі вогнегасної речовини [52]

Вид і спосіб зберігання лісоматеріалів	Інтенсивність подачі вогнегасних речовин, л·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>		
	Вода	Бентоніт, бішофит	Швидкотвердіюча піна
Пиломатеріали в штабелях	0,45	0,2	0,07
Круглі лісоматеріали в штабелях	0,35	0,12	0,15
Щепа, тирса і відходи деревини в купах	0,1	0,06	0,06
<b>Примітки:</b> 1. Склад бентоніту, % по масі: бентонітовий глино порошок — 15-20; піноутворювач — 2; вода — 77-82; карбоксиметилцеллюлоза — 0,1 по відношенню до кількості бентоніту; сода кальцієвана — 1. 2. Склад бішофіту, % по масі: хлористий магній — 96; сульфат кальцію, хлористий кальцій, хлористий натрій та ін. — 4. 3. Склад швидкотвердіючої піни, % по об'єму: карбомидоформальдегідна смола — 20; піноутворювач (типу ПО-ЗНП, ПФ, НС) — 5; затверджувач - сірчана або соляна кислота — 3; вода — 72.			

Висоту лафетних вишок слід приймати не менше висоти штабелів і куп лісоматеріалів. Управління стаціонарними лафетними стволами, які встановлені на вишках висотою до 7 м, має бути ручним, понад 7 м - дистанційне. Лафетні вишки та підставки слід встановлювати від основи штабеля або купи лісоматеріалів на відстані не менше 7 м. Лафетні вишки слід передбачати з негорючих матеріалів IV ступеня вогнестійкості, класів конструктивної пожежної небезпеки С0, С1. Майданчики для встановлення лафетних стволів слід передбачати розміром у плані не менше 2,5х2,5 м або радіусом не менше 1,5 м з огорожею заввишки 1,2 м.

Для одного поста, який захищає штабелі і кучі в радіусі не більше 200 м, повинно бути у наборі пожежної техніки, бойового одягу та пожежного обладнання не менше [52]:

- однієї мотопомпи типу М-1600;
- 10 комплектів одягу для добровільних пожежних;
- 2 лафетних стволів;
- 4 ручних стволів з насадками діаметром 19-21 мм;
- 200 м пожежних рукавів діаметром 65 мм, 2 розгалуження і 2 пожежних колонки.

Підіймально-транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння на відкритих складах лісоматеріалів потрібно розміщувати на відстані не менше 15 м від штабелів. Площа навколо цих засобів має бути вільною від кускових відходів і кори. Паливо для заправки двигунів дозволяється зберігати в кількості не більше однієї бочки на відстані не менше 10 м від місця їх стоянки та 20 м від найближчого штабеля [9]. Загальний об'єм неукладених лісоматеріалів у штабелі не має перевищувати їх добового надходження на склад [230].

Після розгляду та аналізу систем протипожежного захисту складів лісоматеріалів з метою обмеження розповсюдження виниклої пожежі можна зробити наступні висновки:

- існуючі системи протипожежного захисту дійсно забезпечують обмеження розповсюдженню пожежі, яка може виникнути на відкритих складах лісоматеріалів;
- відсутній критерій для оцінки забезпеченості відкритого складу лісоматеріалів системами протипожежного захисту на випадок виникнення пожежі для її оперативної ліквідації;
- відсутня методологія прогнозування забезпеченості відкритих складів лісоматеріалів системами протипожежного захисту при проведенні аудиту пожежної безпеки.

#### **1.5.6. Гасіння пожеж на деревообробних підприємствах**

Пожежне навантаження в цехах деревообробних підприємств залежить від виду виконуючих робіт: на дільницях складання пожежне навантаження складає приблизно 50 кг/м<sup>2</sup>; в цехах фанерного виробництва – 140...170 кг/м<sup>2</sup>; в заготівельних і верстатних цехах біля 200 кг/м<sup>2</sup>; на відкритих складах лісоматеріалів – 500...700 кг/м<sup>2</sup> [181, 141]. Найбільш пожежонебезпечними дільницями деревообробних підприємств є сушильні камери, оздоблювальні

цехи та ділянки фарбування і покриття елементів і виробів лаками, прилади розігріву клею та високочастотного склеювання деревини.

Для гасіння пожеж на деревообробних підприємствах в більшості випадків використовують воду, водні розчини змочувачів, повітряно-механічну піну різної кратності, водяним паром і негорючими газами [52, 181, 141, 32, 210]. При гасінні пожежі у відділеннях, в яких знаходяться устаткування для нагріву сушильних камер, подачу води на нагріті поверхні не рекомендується. В цьому випадку використовують повітряно-механічну піну або вогнегасні порошки [181].

При ліквідації пожежі в складальних, меблевих, фанерних, тарних та столярних цехах пожежа швидко розповсюджується по заготовкам, відходах, системам пневмотранспорту. В цьому випадку в першу чергу необхідно швидко вводити пожежні стволи на шляхах поширення вогню [181, 141, 31, 211].

Основним вогнегасним засобом гасіння пожежі на лісоскладах є вода. Так водою гасять більше 80% пожеж, а водою зі змочувачами – 12% [241]. Це пояснюється тим, що вода має високе значення питомої теплоємності та аномально високе значення теплоти випарювання [226]. Гасіння пожежі організують у відповідності з оперативним планом. Перші підрозділи на гасіння подають стволи А зі знятими насадками. Якщо пожежа знаходиться на початковій стадії, то доцільно одночасно використовувати водяні і пінні стволи. Водяні стволи на гасіння пожежі, а пінні на захист штабелів [141]. Практика гасіння пожеж на лісоскладах показує, що якщо на початковому етапі не забезпечити потрібну інтенсивність подачі вогнегасного засобу на вирішальному напрямку, то пожежа приймає затяжний характер і розповсюджується на значну площу [52, 141]. Оперативне розгортання організують по периметру пожежі. В процесі гасіння пожежі спочатку збивають полум'я із зовнішніх поверхонь штабеля для зменшення впливу теплового випромінювання, а потім подають струмені в середину штабеля зі сторони торців для їх проливання. При гасінні пожеж на лісоскладах

внаслідок їх швидкого розповсюдження, особливо при сильному вітрі, необхідно заздалегідь визначити рубежі вимушеного відступу внаслідок загрози оточення підрозділу пожежею. Для активного наступу на вогнище ствольники повинні підходити до нього як найближче, а для цього вони повинні бути одягнені в тепловідбивний пожежний одяг.

Для прогнозування тривалості гасіння пожежі за допомогою дрібнодисперсної води в деревообробних цехах на ділянках горіння рідин (наприклад, ділянки лакофарбових покриттів) можна використовувати результати роботи [211]. За допомогою номограми для експрес-рішення прямої і зворотної задач пожежогасіння (рис. 1.12).

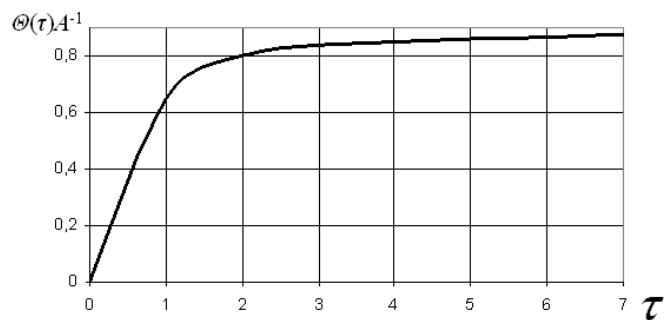


Рис. 1.12. Номограма для експрес-рішення прямої і зворотної задач пожежогасіння

Для розв'язування прямої задачі необхідно спочатку визначити  $\Theta(\tau)$  за залежністю

$$\Theta(\tau) = (T_k - T_z)(T_k - T_0)^{-1}, \quad (1.7)$$

де  $T_k$  – температура кипіння рідини, яка горить;

$T_z$  – температура гасіння рідини, яка горить;

$T_0$  – температура навколишнього середовища.

За відомими значеннями чинників визначають параметр  $A$  за залежністю

$$A = \frac{IraK}{\lambda V(T_k - T_0)}, \quad (1.8)$$

де  $I$  – інтенсивність подачі води;

$r$  – теплота випарювання води;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності рідини, яка горить;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, яка горить;

$V$  – лінійна швидкість розповсюдження пожежі.

За визначеними значеннями  $\Theta(\tau)$  і  $A$  визначають за допомогою номограми (рис. 1.12) значення безрозмірного часу  $\tau$  і за залежністю (1.9) – значення часу гасіння пожежі  $\tau_z$ .

$$\tau_z = \frac{\tau}{V^2 a^{-1}}. \quad (1.9)$$

В роботі [154] була отримана математична модель для визначення часу гасіння пожеж класу А в закритих приміщеннях. Цей час складається з часу локалізації  $\tau_{лок}$  пожежі і часу гасіння  $\tau_z$ , тобто

$$\tau_{лок} = \frac{6,39 S_{лок}^{0,893}}{2N_A + N_B^I} K_I K_d, \quad (1.10)$$

де  $S_{лок}$  – площа локалізації,  $m^2$  (для кругової і кутової пожеж)

$$S_{лок} = \alpha h [10V_l + 2V_l(\tau_{в.з} - 10) - h]; \quad (1.11)$$

для ручних стволів  $h = 5$  м – глибина подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі);

$\alpha$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі: кругова ( $360^\circ$ )  $\alpha = 3,14$  рад; кутова ( $180^\circ$ )  $\alpha = 1,57$  рад; кутова ( $90^\circ$ )  $\alpha = 0,785$  рад;

$V_l$  – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/хв;

$\tau_{в.з}$  – тривалість вільного горіння, хв;

$N_A, N_B^I$  – кількість пожежних стволів А і В на гасіння відповідно;

$K_I = 1,62 - 3,04I_n^\Gamma$  – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання  $I_n^\Gamma$  (л/м<sup>2</sup>с) в осередок пожежі вогнегасної речовини (рекомендоване значення для ручних стволів  $I_n^\Gamma = 0,2$  л/м<sup>2</sup>с);

$K_d = 1,4983 - 0,0262d$  - коефіцієнт, який враховує вплив діаметра насадки  $d$  (мм) ствола (рекомендоване значення діаметра насадки для ручних стволів  $N_B$   $d = 13$  мм; для стволів  $N_A$   $d = 19$  мм; у випадку використання стволів  $A$  і  $B$  приймають середнє значення  $d = 16$  мм);

$$\tau_z = \tau_{лок} \left( \frac{S_{II}}{S_{лок}} - 1 \right); \quad (1.12)$$

$S_{II}$  – площа пожежі, м<sup>2</sup>.

Наведені залежності для визначення тривалості гасіння пожеж від їх класу можуть використовуватися для практичних розрахунків.

Результати розгляду та аналізу сучасного стану гасіння пожеж на деревообробних підприємствах показали:

- відсутні методи визначення сил і засобів для ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах з використанням інформаційних технологій;
- відсутні обґрунтовані методи вибору оптимальних тактичних прийомів ліквідації пожеж як для цехів деревообробних підприємств, так і для відкритих складів лісоматеріалів.

### **1.5.7. Вплив надійності пожежної техніки та спорядження на оперативну-тактичну діяльність пожежно-рятувальних служб та процес ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах**

Процес успішної локалізації та гасіння пожежі на будь-якому об'єкті залежить від професійної майстерності пожежних, їх бойової готовності, мобільного керування тактикою гасіння та надійності пожежної техніки. З



наведеного переліку факторів, які впливають на процес ліквідації пожежі, можна виділити найбільш впливовий – надійність пожежної техніки. Наприклад, в роботі [53] вказується, що в наслідок відмов пожежної техніки в процесі ліквідації пожежі її тривалість може збільшуватися в 1,25...2 рази, що призведе до збільшення втрат як для об'єкта, так і для пожежно-рятувального підрозділу.

Згідно із стандартом ДСТУ 2860-94 основними показниками надійності є імовірність безвідмовної роботи  $R(\tau)$  та коефіцієнт готовності  $A(\tau)$  кожного складового елемента та системи загалом. Результати аналізу існуючих стандартів стосовно пожежно-рятувального обладнання та техніки (ДСТУ 3687-98, ДСТУ 2111-92, ДСТУ 2112-92, ДСТУ 2802-94, ДСТУ-П 7290:2012 та інших), а також науково-технічної та довідникової літератури показали, що для пожежно-рятувального обладнання та техніки відсутні значення основних показників надійності. В деяких стандартах наведено тільки значення напрацювання на відмову, але в більшості випадків вони є не обґрунтованими. Тому виникає проблема у визначенні хоча б в деякій мірі наближених до дійсних значень основних показників надійності пожежної техніки для локалізації та гасіння пожежі, що дозволить з їх урахуванням забезпечити якісний процес ліквідації пожежі.

Перші дослідження надійності технічних об'єктів розпочалися на початку 1945 року в США. Причиною цих досліджень стали багаточисельні відмови військової техніки, яка призначалася для бойових дій. Наприклад, 60% літаків, призначених для бойових дій на Далекому Сході, виявилися недієздатними [77]. Для розв'язування задач, які були пов'язані з надійністю технічних об'єктів, почали розвиватися роботи по виконанню експериментальних досліджень для визначення фактичної надійності і на цій основі почала створюватися математична теорія надійності. Значний вклад в цьому напрямку внесли Б.І. Костецький, О.С. Проніков, Д.М. Решетов та багато інших.

Стосовно надійності пожежної техніки в 90 роках минулого століття були розроблені ДСТУ, в яких почали вводити значення показників надійності. Наприклад, в ДСТУ 3286-95 (ГОСТ 26938-95) (Автомобілі гасіння. Загальні технічні умови), який пізніше був замінений ДСТУ-П 7290:2012, наведено значення тривалості напрацювання на відмову у вигляді пробігу автомобілем 5000 км при швидкості руху 50 км/год, що відповідає  $T_B = 100$  год. Але крім цього показника надійності в стандарті нічого не наведено. Тому не можливо щось прогнозувати стосовно імовірності безвідмовної роботи. Крім цього, наведене значення  $T_B = 100$  год є не обґрунтованим.

В 1988 році вийшла робота [206], в якій пропонується для уточнення  $T_B$  метод статистичного моделювання, тобто методика для уточнення значень показників надійності. В нашій країні одними із перших робіт, які були присвячені визначенню основних показників надійності пожежної техніки, були роботи [54, 155]. Аналізуючи результати цих робіт можна зауважити, що наведена методика визначення основних показників надійності пожежної техніки базується на даних напрацювання на відмову  $T_B$ , які наведені в ДСТУ. При цьому не враховувалося зменшення тривалості напрацювання на відмову внаслідок певного часу експлуатації пожежної техніки, а також надійність її структурних складових. Але, навіть при наявності розглянутих результатів досліджень, виникає проблема в тому, що зовсім не розглядалося визначення основних показників надійності для пожежної техніки як для системи, яка складається з багатьох складових елементів.

Результати розгляду та аналізу сучасного стану надійності пожежної техніки та спорядження дозволили зробити наступні висновки:

- для забезпечення своєчасної ліквідації пожежі необхідно при визначенні кількості пожежної техніки враховувати її надійність;
- для обґрунтованого визначення тривалості напрацювання пожежної техніки на відмову необхідно використовувати метод статистичного

моделювання, що дозволить визначити імовірність безвідмовної роботи всіх конструктивних елементів всієї системи ліквідації пожежі.

## **1.6. Сучасні методи визначення та підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій деревообробних підприємств**

Відомо, що на вогнестійкість будівельних конструкцій і в першу чергу на їх міцність впливають температура пожежі та тривалість її в процесі вільного розвитку [232]. Встановлено, що вже на початковій стадії пожежі середньооб'ємна температура в приміщенні досягає 350 °С [231]. При тривалості пожежі 25...30 хв середньооб'ємна температура вже досягає 900 °С [232]. На підставі нормативних і статистичних даних було встановлено, що середнє значення тривалості вільного розвитку пожежі становить 25...36 хв [55].

За цей час середньооб'ємна температура в приміщенні може досягти 965...980 °С, що може привести до руйнування залізобетонних фермових конструкцій. Тому для оперативного початку ліквідації пожежі необхідно знати межу вогнестійкості будівельних конструкцій цехів деревообробних підприємств, щоб ще до початку руйнування конструкції ліквідувати дію на них температури, тобто щоб початок ліквідації пожежі був менший межі вогнестійкості.

Для визначення межі вогнестійкості несучих будівельних конструкцій використовують експериментальний і розрахунковий методи. Експериментальні методи дозволяють отримати точні дані, але їх вартість дуже велика. Наприклад, за даними роботи [284] вартість розрахункових методів визначення вогнестійкості становить менше 1% від вартості експериментальних випробувань.

Технічним комітетом CEN/TC 250 були розроблені стандарти під назвою «Будівельні Єврокоди» [263, 264]. Методика розрахунку на вогнестійкість за цими стандартами дає можливість з урахуванням

пожежного ризику визначати необхідні сценарії пожеж і відповідні температурні режими. Наведені стандарти після перекладу на українську мову впроваджені для розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій в Україні. Результати розрахунку вогнестійкості за стандартом [264] показали, що середня похибка при порівнянні з результатами експерименту становить 6,5%. Така похибка є допустимою для виконання інженерних розрахунків.

Для підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій використовують різні методи, які досліджувалися в роботі [203]. Результати цієї роботи дозволили отримати такі дані:

1. Підвищення вогнестійкості за рахунок збільшення захисного шару бетону, що дозволяє збільшити час, за який арматура прогрівається до критичної температури. Розглядалася зміна тривалості прогріву залізобетонної плити перекриття при товщині захисного шару 20, 25 та 30 мм з урахуванням часу вільного розвитку пожежі 45 хв. Результати розрахунків наведені на рис. 1.13.

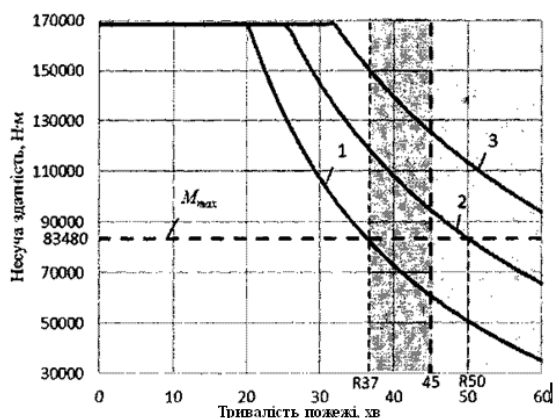


Рис. 1.13. Зміна межі вогнестійкості за несучою здатністю R [136]:  
1 – при товщині захисного шару 20 мм; 2 – 25 мм; 3 – 30 мм

З аналізу рис. 1.13 видно, що при товщині захисного шару 20 мм час втрати несучої здатності дорівнює 37 хв. В цьому випадку є імовірність руйнування конструкції ще до ліквідації пожежі. При товщині захисного шару 25 мм критичний час втрати несучої здатності дорівнює 50 хв, а при 30 мм – ще більший.

2. Підвищення вогнестійкості за рахунок нанесення захисного покриття. Такими захисними покриттями можуть бути: цементно-піщана штукатурка; гіпсова штукатурка; покриття з силіційорганічними наповнювачами. Результати досліджень показали, наприклад, що при нанесені штукатурок товщиною 10 мм і покриття товщиною 0,4 мм вогнестійкість підвищується для штукатурок до 68 хв і до 62 хв відповідно, а для покриття до 86 хв.

3. Підвищення вогнестійкості за рахунок використання підвісної стелі шляхом монтажу будівельних листів із гіпсокартону. Залізобетонна плита в цьому випадку прогрівається повільно за рахунок захисту листом гіпсокартону та повітряним простором між ними. В цьому випадку вогнестійкість досягає 69 хв.

Результати розгляду та аналізу сучасного стану визначення та підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій деревообробних підприємств показали:

- в науково-технічній літературі відсутні дані по визначенню межі вогнестійкості будівельних конструкцій скатних крівель цехів;
- відсутні дані і методи по підвищенню межі вогнестійкості будівельних конструкцій скатних крівель цехів;
- відсутність даних по межі вогнестійкості будівельних конструкцій скатних крівель цехів не дозволяє в повному обсязі прогнозувати успішне виконання роботи пожежно-рятувальних підрозділів для ліквідації пожеж в цехах деревообробних підприємств.

## **1.7. Висновки**

На підставі розгляду сучасного стану щодо проблеми забезпечення пожежної безпеки деревообробних підприємств можна зробити такі висновки:

1. Встановлено, що приміщення цехів деревообробних підприємств відносять до категорії В із характеристикою їх як пожежонебезпечні внаслідок наявності в цих приміщеннях горючого пилю, що утворює пилеповітряні суміші, а також внаслідок наявності відходів механічної обробки та твердих горючих матеріалів.

2. Результати розгляду та аналізу математичних моделей тепломасообміну при пожежі в приміщеннях цехів деревообробних підприємств показали, що вони використовувалися головним чином для аналізу пожеж в приміщеннях житлових будівель, торгівельно-розважальних центрів, атриумів тощо. Зовсім не підлягали розгляду питання прогнозування тепломасообміну при пожежі в приміщеннях деревообробних цехів з визначенням критичного часу пожежі для різних можливих ситуацій.

3. Розроблені математичні моделі пожеж для відкритих складів лісоматеріалів виконані з використанням теорії імовірності і для прогнозування розвитку пожежі на складі необхідно використовувати результати експериментів, а саме середньомірну ідентифікацію розвитку пожежі.

4. Стосовно використання математичних моделей лісових пожеж для моделювання пожеж на відкритих складах лісоматеріалів можна зауважити ті, що лісові пожежі розповсюджуються безперервно, а на складах – дискретно від одного штабеля до наступного. З математичних моделей лісових пожеж можна запозичити такий чинник як вплив вітру на швидкість розповсюдження пожежі.

5. Встановлено, що при існуючому стані обмеження розповсюдження пожежі в деревообробних цехах не розглядаються методи для визначення складу систем протипожежного захисту виходячи з конкретних існуючих умов кожного цеху. Відсутні критерії та методологія для оцінки забезпеченості деревообробного цеху системами протипожежного захисту на випадок виникнення пожежі для її оперативної ліквідації, а також відсутня

методологія оперативного визначення сил і засобів для ліквідації пожежі в деревообробному цеху з використанням інформаційних технологій.

6. Існуючі системи протипожежного захисту відкритих складів лісоматеріалів забезпечують обмеження розповсюдженню пожежі, яка може виникнути на їх території. Для оцінки забезпеченості відкритого складу лісоматеріалів системами протипожежного захисту відсутні критерії для його достатнього протипожежного захисту на випадок виникнення пожежі та її оперативної ліквідації. Відсутня методологія прогнозування забезпеченості відкритих складів лісоматеріалів системами протипожежного захисту.

7. Відсутні обґрунтовані методи вибору оптимальних тактичних прийомів ліквідації пожеж як для цехів деревообробних підприємств, так і для відкритих складів лісоматеріалів.

8. Для забезпечення своєчасної ліквідації пожежі необхідно при визначенні кількості пожежної техніки враховувати її надійність. З метою обґрунтованого визначення тривалості напрацювання пожежної техніки на відмову необхідно використовувати метод статистичного моделювання, що дозволить обґрунтовано визначати імовірність безвідмовної роботи всіх конструктивних елементів всієї системи ліквідації пожежі.

9. 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 розглядалися.

10. В науково-технічній літературі відсутні дані по визначенню межі вогнестійкості будівельних конструкцій скатних крівель деревообробних цехів. Відсутність даних по межі вогнестійкості будівельних конструкцій скатних крівель цехів не дозволяє в повному обсязі прогнозувати успішну ліквідацію пожеж в цехах деревообробних підприємств.

## РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖНИХ СИТУАЦІЙ З ОЦІНКОЮ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕННЯХ БУДІВЕЛЬ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

### 2.1. Основні конструктивні особливості приміщень цехів деревообробних підприємств

Розроблення будь-яких моделей розвитку та поширення пожежі в приміщеннях будівель деревообробних підприємств неможливе без досконалого вивчення конструктивних особливостей цих об'єктів, а саме існуючих на даний час просторових конструкцій приміщень будівель. Деревообробна галузь об'єднує значну групу виробництв, які пов'язані з механічною обробкою деревини. Цю галузь можна поділити на чотири основних групи виробництв: 1) лісопильно-деревообробні; 2) клеєних матеріалів і плит; 3) виробів з деревини; 4) спеціальні [22]. Для кожної з цих груп виробництв використовують відповідні споруди з певними типами конструкцій виробничих приміщень і складів. Схема класифікації споруд деревообробних підприємств зображена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Схема класифікації споруд деревообробних підприємств



Найбільше поширення отримали закриті приміщення цехів деревообробних підприємств із сіткою колон ( $b \times l$ ) 18х6, тобто з шириною прольоту 18 м і кроком колон 6 м. Висота цеху до ферм – 6 м. Переріз такого приміщення цеху зображено на рис. 2.2.

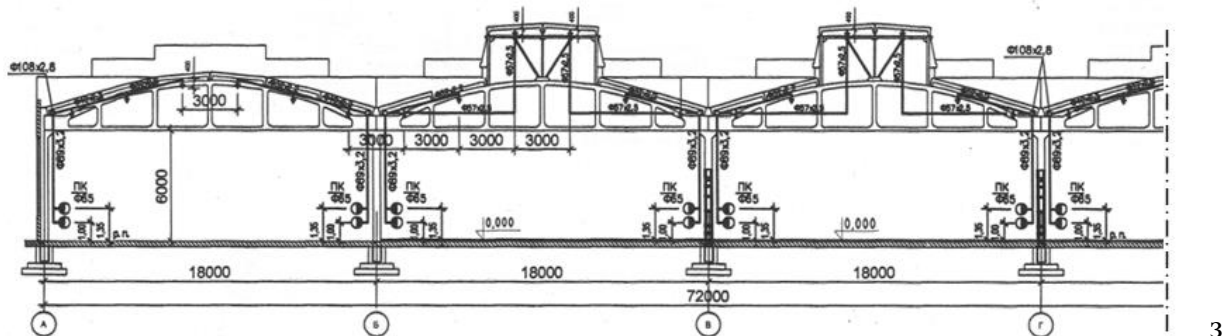


Рис. 2.2. Вид поперечного перерізу опоряджувально-складального цеху деревообробного підприємства (м. Самбір Львівської області, вул. В. Чорновола, 36)

При проектуванні, реконструкції та будівництві нових цехів деревообробних підприємств в більшості випадків використовують уніфіковані типові секції (УТС) II типу з шириною прольотів 18, 24, 30 м, які кратні основному будівельному модулю  $M = 600$  мм або 6 м. При ширині прольотів 18 і 24 м використовують залізобетонні ферми, а при ширині прольотів 30 м – сталеві ферми.

Стандартний розмір УТС: ширина  $B = 72$  м; довжина  $L = 144$  м (можливо також використовувати УТС з розмірами 72х72 м). При необхідності довжина  $L$  може бути збільшена за рахунок прибудови до неї декількох прольотів [163]. Прольоти УТС можуть бути з вентиляційними ліхтарями і без них. Висота одноповерхових УТС до ферм може бути в залежності від обладнання цеху: без мостових кранів 6 або 7,2 м; з мостовими кранами 10,8 або 12,6 м. Загальна кількість евакуаційних виходів не менше 6.

Середнє значення пожежного навантаження в цехах деревообробних підприємств знаходиться в межах  $200 \text{ кг/м}^2$ . Безумовно воно залежить в першу чергу від виду обладнання та оброблювальних заготовок.

Огороджувальні конструкції стін між відділеннями, які утворюють пожежних відсіків, виконують з цегли.

## **2.2. Моделювання прогнозування розповсюдження пожежі в закритих приміщеннях**

За результатами експериментальних досліджень, які були отримані у ВНДПЗ (Росія), був розроблений метод визначення небезпечних чинників пожежі з одночасним встановленням лінійної швидкості поширення полум'я при пожежі для лісопильних цехів I...V ступенів вогнестійкості, для деревообробних цехів, цехів сушки деревини та виробництва фанери, а також для штабелів відкритих складів лісоматеріалів [55]. Отримані результати були значним вкладом у подальший розвиток методів моделювання пожеж, які виникають на деревообробних підприємствах. Такими методами стали інтегральна модель розрахунку тепломасообміну при пожежі в приміщенні та диференціальна (польова) модель, яка базується на використанні диференціальних рівнянь у часткових похідних, що описують просторово-часовий розподіл температур, швидкостей газового середовища в приміщенні, концентрацій компонентів газового середовища тощо. На підставі цих моделей розроблені пакети прикладних програм, за допомогою яких можливо виконувати з використанням комп'ютера дослідження процесів розповсюдження пожежі в приміщенні. Прикладом таких програм є програма FDS, яка розроблена лабораторією будівельних і пожежних досліджень (BFRL) національного інституту стандартів і технологій США [73].

Іншою такою розробкою є програмний комплекс SOFIE [164, 165]. Цей комплекс використовує математичну модель, яка включає: рівняння нерозривності, три рівняння збереження імпульсу уздовж кожної з координат, рівняння збереження енергії, рівняння перенесення для маси пари палива і функції змішення, а також рівняння  $k - \epsilon$  моделі турбулентності з

поправкою на вплив природної конвекції. Процес горіння моделювався за допомогою дифузійно-вихрової моделі Магнуссена-Х'єртагера.

У зв'язку з виконанням розрахунку оцінки безпеки евакуації людей (моделювання обмежується початковою стадією пожежі) для обліку радіаційного теплопереноса використовувалася спрощена  $\chi_R$  - модель. Згідно із рекомендаціями Міністерства російської федерації у справах цивільного захисту, надзвичайних ситуацій і ліквідації наслідків стихійних лих та ВНДПЗ використовувався програмний комплекс SOFIE, наприклад, для розгляду пожеж в атриумах багатоповерхових будівель. Результати цих досліджень показали, що найбільша небезпека при прогнозуванні пожежі – це пожежі, які виникають на першому поверсі. В цьому випадку існує можливість розповсюдження диму по всіх поверхах через вільний об'єм атриуму.

Але, навіть при наявності розглянутих результатів досліджень, виникає проблема в тому, що зовсім не розглядалося 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.

Ставиться задача розглянути і проаналізувати пожежні ситуації в закритих приміщеннях деревообробних підприємств з визначенням швидкості розповсюдження пожежі та її критичного часу. Для розв'язування поставленої задачі доцільно використовувати систему FDS, яка удосконалена ТОВ «Сітіс» (м. Єкатеринбург, Росія) [73] і яка дозволяє виконувати прогнозування розповсюдження пожежі для різних об'єктів. Ця система побудована на використанні рівнянь, які описують [8]:

– закон збереження маси

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial z} = 0, \quad (2.1)$$

де  $\rho$  – густина середовища (невідомо величина), кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – час, с;

$x, y, z$  – координати в тривимірному просторі в декартовій системі координат, м;

$U, V, W$  – компоненти швидкостей руху газоповітряних сумішей (продуктів горіння та повітря) відповідно в напрямку  $x, y, z$ , (невідомі величини), м/с;

– закон збереження маси окремих компонентів суміші газів

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} + U \frac{\partial X_i}{\partial x} + V \frac{\partial X_i}{\partial y} + W \frac{\partial X_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_i \frac{\partial X_i}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_i \frac{\partial X_i}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D_i \frac{\partial X_i}{\partial z} \right) + (m_i)_{\text{вн}}, \quad (2.2)$$

де  $X_i = \rho_i / \rho$  – масова концентрація  $i$ -го компоненту суміші газів;

$D_i$  – коефіцієнт дифузії  $i$ -го компоненту газу, м/с<sup>2</sup>;

$(m_i)_{\text{вн}}$  – кількість виділеного  $i$ -го продукту горіння за одиницю часу на одиницю об'єму, кг/(м<sup>3</sup>·с);

– закон збереження імпульсу

$$\left. \begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + \rho g; \\ \rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + \rho g; \\ \rho \left( \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho g, \end{aligned} \right\} (2.3)$$

де  $p$  – тиск, Па;

$\sigma_{ij}$  – тензор в'язких напружень, Па;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

перший член рівняння описує не стаціонарність потоку, другий – конвекційний перенос, третій та четвертий члени – поверхневі сили (градієнт тиску та молекулярна дифузія) п'ятий – масові сили (гравітація); тензор напружень за гіпотезою Стокса згідно [14]

$$\sigma_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \tau_{ij}, \quad (2.4)$$

де  $\tau_{ij}$  – символ Кронекера ( $i=j \rightarrow \tau_{ij}=1$ ,  $i \neq j \rightarrow \tau_{ij}=0$ );

$\mu$  – коефіцієнт в'язкості суміші газів;

– закон збереження енергії

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial E}{\partial t} + U \frac{\partial E}{\partial x} + V \frac{\partial E}{\partial y} + W \frac{\partial E}{\partial z} \right) = & - \left( \frac{\partial(pU)}{\partial x} + \frac{\partial(pV)}{\partial y} + \frac{\partial(pW)}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} (\sigma_{xx}U + \sigma_{xy}V + \sigma_{xz}W) + \frac{\partial}{\partial y} (\sigma_{xy}U + \sigma_{yy}V + \sigma_{yz}W) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma_{xz}U + \sigma_{yz}V + \sigma_{zz}W) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \end{aligned} \quad (2.5)$$

де  $E$  – питома повна енергія, Вт;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С);

$T$  – температура, °С;

$Q$  – питома енерговиділення в зоні хімічної реакції;

– теплоперенос при пожежі

$$Q = \alpha \cdot (T_1 - T) + \varphi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T^4), \quad (2.6)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь чорноти,

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$\varphi$  – кутовий коефіцієнт;

$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – стала Стефана – Больцмана;

– теплообмін з огорожувальними конструкціями

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\tilde{n} \cdot \rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2.7)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°С;

$c$  – питома теплоємність матеріалу, Дж/кг·°С;

$\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

– густина теплового потоку випромінюванням, Вт/м<sup>2</sup>

$$q = \alpha \cdot (T - T_w) + \varphi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_w^4), \quad (2.8)$$

де  $T_w$  – температура огорожувальної конструкції, °С;

– рівняння стану газу

$$p = \frac{\rho RT}{M}, \quad (2.9)$$

де  $R$  – постійна газова стала, Дж/(моль·°С);

$M$  – молярна маса суміші газів, кг/моль;

– відстань  $R_n$ , на яку розповсюджується полум'я пожежі

$$R_i = v \cdot \tau, \quad (2.10)$$

де  $v$  – лінійна швидкість розповсюдження полум'я, м/с;

$\tau$  – тривалість пожежі, с;

– кількість газів, що виділяються за одиницю часу

$$(m_i)_{\text{вн}} = \frac{\eta \psi S_i L_i}{\Delta V}, \quad (2.11)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт повноти згорання;

$\psi$  – питома швидкість вигорання горючого матеріалу, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$S_{\text{пл}}$  – площа пожежі, м<sup>2</sup>;

$L_i$  – кількість виділеного  $i$ -го компонента газу з 1 кг матеріалу, кг/кг;

$\Delta V$  – об'єм прилеглих комірок до осередку пожежі, в які проходить виділення, м<sup>3</sup>;

– питоме тепловиділення від зони горіння в прилеглі комірці, в які здійснюється теплообмін

$$(Q)_{xim} = \frac{\eta \psi S_n Q_0}{\rho \Delta V}, \quad (2.12)$$

де  $Q_0$  – найнижча теплота згорання матеріалу, кДж/кг;

$\rho \Delta V$  - маса газу в розрахунковій комірці, кг.

Для роботи програми необхідно ввести вихідні дані:  $Q_0$ , кДж/кг;  $v$ , м/с;  $\psi$ , кг/м<sup>2</sup>с;  $D_{dim}$ , г/кг;  $D_{O_2}$ , кг/кг;  $D_{CO_2}$ , кг/кг;  $D_{CO}$ , кг/кг; матеріали огорожувальних конструкцій (цегла, залізобетон тощо) та значення їх параметрів, а саме  $\lambda$ , Вт/м°C;  $c$ , Дж/кг°C;  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>.

Крім програми FDS при розгляді моделювання пожежних ситуацій в закритих приміщеннях деревообробних підприємств використовували пакет прикладних програм для побудови ізотерм та ізотермічних поверхонь, тобто температури  $T_i$  в °C в будь-якій точці закритого приміщення з урахуванням температури осередку пожежі. При цьому використовували основну залежність [8]

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_{i.i.} \cdot \frac{\tilde{N}_0 \cdot G^{0,75} \cdot \tau_{a.a.}^{0,18} \cdot Z^{1,5} \cdot S_i^{0,13}}{R^{0,71}}, \quad (2.13)$$

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

$$C_T = 0,014 \frac{M^{0,45}}{x \cdot \tau^{0,18} \cdot \kappa \tau^{0,75}}$$

Для визначення температури  $T_{o.n.}$  в °C осередку пожежі використовували залежність [16]

$$T_{i,i} = \frac{10^3 Q_{i,d,ndd} S_n \tau_{a,a}}{\tilde{n}_{ndd} M} - 273, \quad (2.14)$$

де  $Q_{n,p,cep}$  – середнє значення найнижчої робочої теплоти згорання для даного приміщення, в 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.

### **2.3. Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі в приміщеннях цехів деревообробних підприємств**

*Розглянемо і проаналізуємо прогноз пожежних ситуацій з використанням наведених пакетів прикладних програм в опоряджувально-складальному цеху деревообробного підприємства (м. Самбір Львівської області, вул. В. Чорновола, 36) [8]. Загальна характеристика цеху: загальна площа приміщень – 14256 м<sup>2</sup>; висота цеху до ферм – 6 м; об'єм приміщень до ферм – 85536 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 виконані з цегли. Загальна кількість евакуаційних виходів 6, а працюючих в одну зміну 152 особи. Загальний вид цеху зображено на рис. 2.3, а план компонування цеху – на рис. 2.4.*

Розглянемо моделювання пожежних ситуацій в приміщеннях цеху деревообробного підприємства (м. Самбір) 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.

Такими *пожежними ситуаціями* можуть бути:

- *кругова пожежа в центрі цеху* у відділені пакування (осередок



займання *I* знаходиться в осях В-Г і між колонами 17-18 – рис.2.4);



Рис. 2.3. Зовнішній вид опоряджувально-складального цеху деревообробного підприємства (м. Самбір)

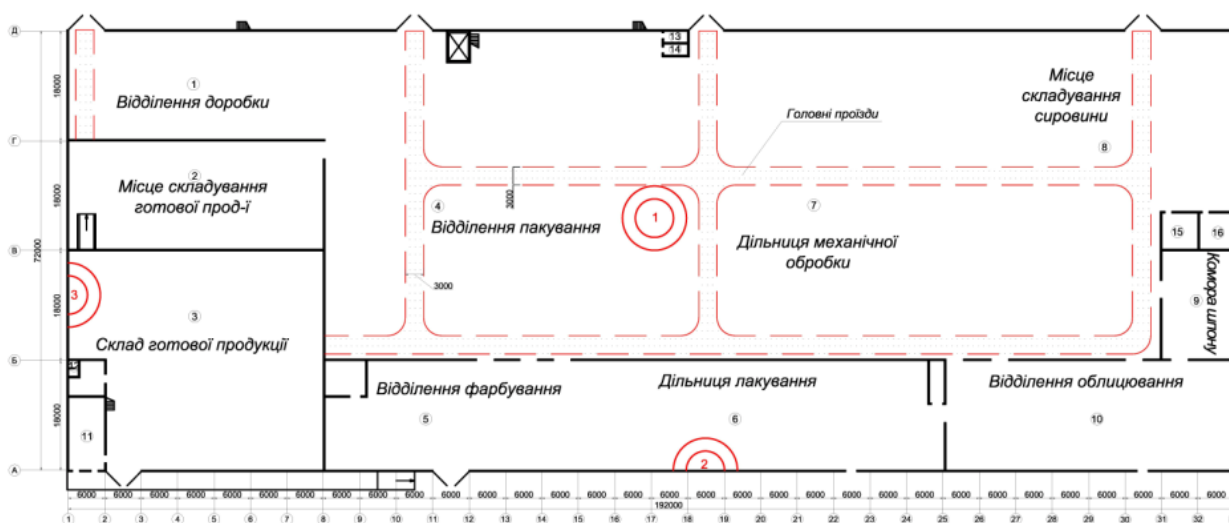


Рис. 2.4. Компонувальний план опоряджувально-складального цеху

- **кутова пожежа (180°) у відділенні лакування** (осередок займання 2 знаходиться в осях А-Б і між колонами 18-19 – рис.2.4);

- **кутова пожежа (180°) на складі готової продукції** (осередок займання 3 знаходиться в осях Б-В і між колонами 1-2 – рис.2.4).

Для визначення критичного часу пожежі враховуємо значення допустимої концентрації токсичних речовин для життєдіяльності людини. Критичне значення густини кисню  $\rho_{i_{2e}} = 0,226 \text{ кг/м}^3$ , максимально допустиме значення оптичної густини диму, величина якої може бути  $\mu \leq 1,2 \text{ Нп/м}$ , що забезпечує видимість до 2 м, тобто в межах росту людини, яка при переміщенні може бачити підлогу. Критична для людини температура на проходах до евакуаційних виходів не повинна перевищувати 70°C.

Крім цього, концентрація  $K_i$  виділених токсичних продуктів у межах критичного часу пожежі не повинна перевищувати допустимих значень: двоокис вуглецю  $[K_{CO_2}] = 90 \text{ г/м}^3$ ; оксид вуглецю  $[K_{CO}] = 2,4 \text{ г/м}^3$ .

Розглянемо *першу пожежну ситуацію*, коли прогнозований осередок кругової пожежі виник у центральній частині цеху (рис. 2.5).

В поперечному перерізі цеху, який розглядається у вертикальній площині по висоті до ферм, ізотерми на 2-й хв пожежі розміщуються так, як зображено на рис. 2.6. Температура конвективної колонки осередку пожежі на висоті 6 м, тобто на нижній основі аркової залізобетонної безроскісної ферми, вже на другій хвилині досягає  $420^\circ\text{C}$  (рис.2.6). Кривля цеху, до якої доходить конвективна колонка, знаходиться вище основи ферми на 3 м і на рис. 2.6 вона не зображена.

З аналізу ізотерм видно, що на висоті до 2 м від підлоги температура середовища не перевищує  $58^\circ\text{C}$ .

Результати досліджень показали, що на 6-й хв пожежі центральна частина цеху знаходиться в пожежі і тільки на торцях у межах колон 1...6 по осях Г-Д та 29...33 по осях В-Д залишаються площі в межах  $600...650 \text{ м}^2$  кожна з температурою навколишнього середовища цеху до  $70^\circ\text{C}$ . На цих площах розміщено по одному евакуаційному виходу, тобто при сповіщенні про пожежу в центрі цеху, працюючі цеху повинні збиратися для евакуації на цих площах.

На 10-й хв пожежі на складі готової продукції температура середовища не перевищувала  $30^\circ\text{C}$ , а у відділеннях складування готової продукції, фарбування та лакування температура середовища не перевищувала  $100^\circ\text{C}$ .

В той же час у відділенні облицювання температура середовища доходила до  $125^\circ\text{C}$ , в коморі шпону – до  $138^\circ\text{C}$ . На 15-й хв від початку пожежі цех був охоплений полум'ям.

При пожежній ситуації, коли пожежа розпочалася в центральній частині цеху, швидкість розповсюдження пожежі по довжині цеху  $L_{\text{ц}}$  буде

$$v = \frac{L_{\delta}}{2\tau_{\dot{a},p}} = \frac{192}{2 \cdot 15} = 6,4 \text{ м/хв.}$$

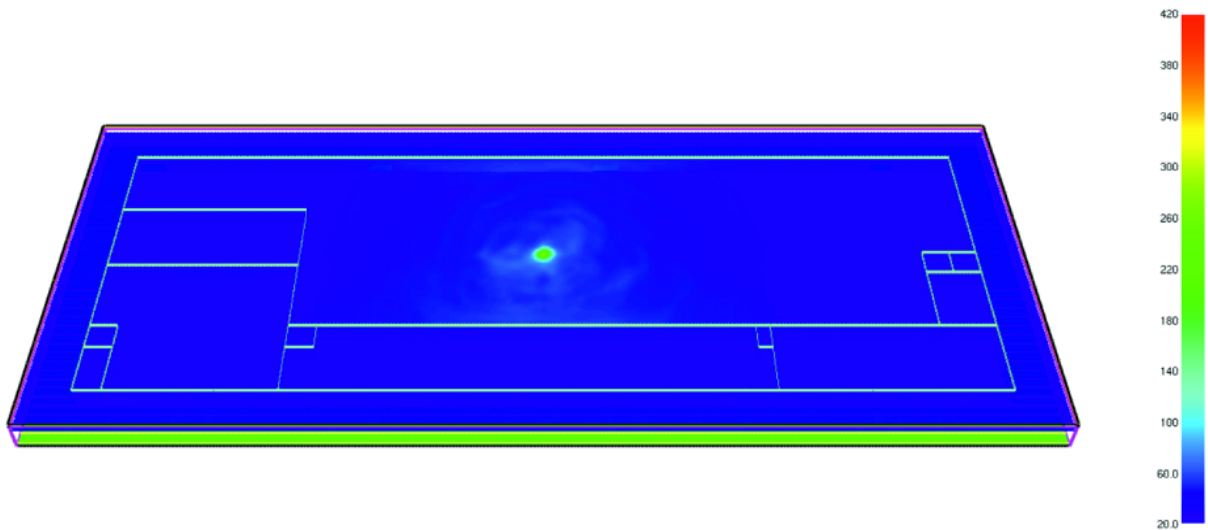


Рис. 2.5. Осередок кругової пожежі на 2 хв, який знаходиться в центральній частині цеху

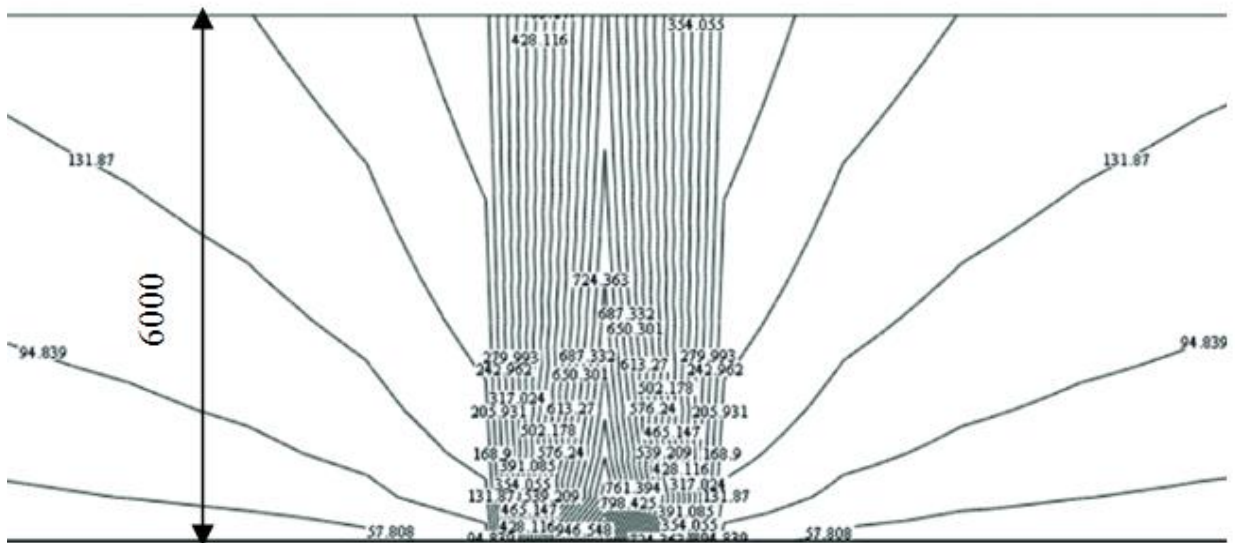


Рис. 2.6. Розміщення ізотерм у вертикальному перерізі цеху по висоті 6 м (6000 мм) на 2 хв пожежі

Аналізуючи отриманий результат, встановлюємо, що швидкість розповсюдження пожежі дуже велика. Недоліком конструкції цеху, який розглядається, є те, що необхідно було б усі відділення відокремлювати одне

від одного огорожувальними конструкціями, які в декілька разів зменшують швидкість теплопередачі і відповідно швидкість розповсюдження пожежі. Крім цього, треба зауважити, що за час 15 хв не мають змоги прибути до місця виникнення пожежі пожежно-рятувальні підрозділи державної служби цивільного захисту (в самому кращому випадку, коли на об'єкті встановлені пожежні сповіщувачі, час гасіння пожежі може початися тільки після тривалості вільного розвитку пожежі через 20...25 хв). Тому для такого деревообробного підприємства необхідно мати власну добровільну пожежну службу.

Тепер розглянемо 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. 2.7 і 2.8.

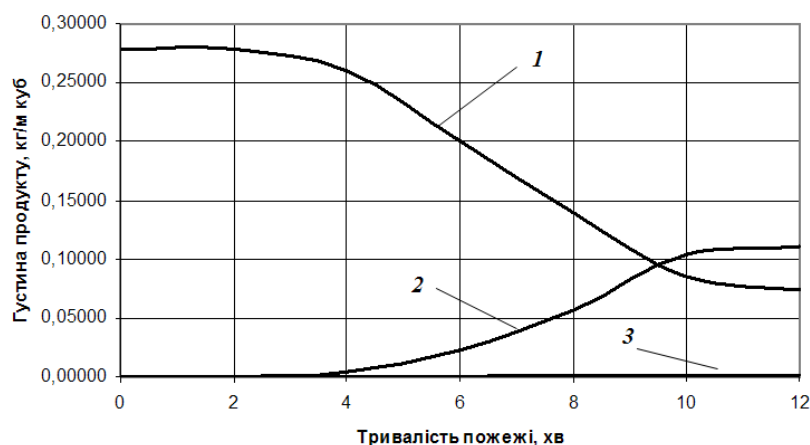


Рис. 2.7. Вплив тривалості вільного розвитку пожежі на зменшення густини кисню – **1**, на виділення двоокису вуглецю – **2** та оксиду вуглецю – **3**

Аналізуючи отримані графічні залежності (рис. 2.7) встановлюємо, що максимально допустиме критичне значення густини  $O_2$  ( $\rho_{O_2к} = 0,226 \text{ кг/м}^3$ ) настає при тривалості вільного розвитку пожежі до  $\tau_{в,р} = 5,3 \text{ хв}$  (залежність **1**, рис. 2.7). Гранично допустиме значення двоокису вуглецю ( $[K_{CO_2}] = 90 \text{ г/м}^3$ ) в приміщенні опоряджувально-складального цеху було визначено при

тривалості вільного розвитку до  $\tau_{e,p} = 9,4$  хв (залежність 2, рис. 2.7), а оксиду вуглецю за цей же час –  $K_{CO} = 1,4$  г/м<sup>3</sup> (залежність 3, рис. 2.7).

На підставі аналізу оптичної густини диму в приміщенні опоряджувально-складального цеху в процесі вільного розвитку пожежі можна зауважити, що його допустиме значення настає при  $\tau_{e,p} = 7,7$  хв (рис. 2.8).

Таким чином, прогнозування виникнення та розповсюдження пожежі в приміщенні опоряджувально-складального цеху за допомогою польового методу математичного моделювання пожеж у приміщеннях з використанням програми FDS дозволив встановити критичний час пожежі.

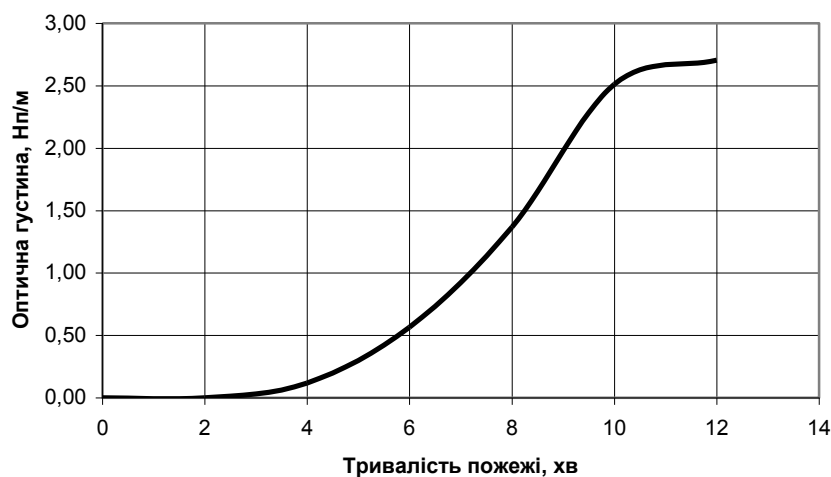


Рис. 2.8. Вплив тривалості вільного розвитку пожежі на значення оптичної густини диму

Отримані за допомогою математичної моделі пожежі числові значення чинників, які впливають на тривалість критичного часу пожежі, мають такі значення: 1) критична для людини температура на проходах до евакуаційних виходів, яка не перевищує 70°C, виникає за повних **6 хв** пожежі; 2) критичне значення густини  $O_2$  утворилося в цеху за **5,3 хв**; 3) гранично допустиме значення двоокису вуглецю на евакуаційних проходах цеху утворилося за **9,4 хв**, а оксиду вуглецю за цей час було в межах допустимого значення; 4) гранично допустиме значення оптичної густини диму для нормального

переміщення людей вздовж евакуаційних проходів цеху утворилося за **7,7 хв** (додаток 1).

На підставі отриманих даних встановлюємо, що критичний час пожежі становить  $\tau_k = 5,3$  хв. Успішність проведення евакуації працюючих з цеху встановлюється після визначення імовірності її виконання за залежністю [166]

$$P_{\dot{a}\dot{a}.e} = \frac{0,8\tau_k - \tau_e}{\tau_{i.\dot{a}}},$$

де  $\tau_e$  – час евакуації, хв;

$\tau_{n.e}$  – інтервал часу від початку пожежі до початку евакуації, хв;

$\tau_{n.e} = 2...4$  хв для промислових приміщень цехів, які споряджені системою сповіщення та керуванням евакуацією;

$$\tau_e = \frac{L_e}{kV_e};$$

$L_e$  – шлях евакуації, м;

$k$  – кількість евакуаційних виходів з приміщення;

$V_e$  – середня швидкість вільного руху людського потоку, м/хв; згідно із рекомендаціями [166], середня швидкість по горизонтальній поверхні коливається в межах 66...90 м/хв;

$$L_e = k_{\dot{e}\dot{o}} \sqrt{L^2 + B^2};$$

$k_{kr} = 1,4$  – коефіцієнт, який враховує кривину шляху евакуації;

$L$  – довжина площадки стікання людського потоку для евакуації, м;

$B$  – ширина площадки стікання людського потоку для евакуації, м;

$k$  – кількість евакуаційних виходів.

Розміри площадки, на яку стікається людський потік, повинні бути більші кількості людського потоку, який буде на ній розміщений, тобто

$$Nq \leq LB,$$

де  $N$  – загальна кількість працюючих, яка розміщується на площадці для евакуації;

$q$  - густина людського потоку при евакуації в приміщенні з використанням горизонтального шляху ( $q = 0,51$  люд./м<sup>2</sup> [166]).

Для ситуації виникнення та розповсюдження пожежі, яка розглядається, вихідними положеннями при визначенні імовірності успішної евакуації працюючих з опоряджувально-складального цеху є:  $\tau_k = 5,3$  хв; загальну кількість працюючих розділяємо на два потоки  $N_1 = N_2 = 76$  чоловік; для кожного потоку по одному евакуаційному виходу  $k = 1$ ; середнє значення довжини шляху евакуації для кожного потоку  $L_e = 1,4\sqrt{24^2 + 36^2} = 60$  м;  $q = 0,51$  люд./м<sup>2</sup>;  $V_e = 80$  м/хв;  $\tau_{n.e} = 3,5$  хв.

Визначаємо  $N_1q = N_2q = 76 \cdot 0,51 = 38,8$  м<sup>2</sup> < 600 м<sup>2</sup>, що забезпечує нормальні умови для розміщення людей.

Тривалість евакуації

$$\tau_e = \frac{60}{1 \cdot 80} = 0,75 \text{ хв.}$$

У цьому випадку імовірність успішної евакуації працюючих з опоряджувально-складального цеху

$$P_{\text{д.е}} = \frac{0,8 \cdot 5,3 - 0,75}{3,5} \approx 1.$$

Таким чином, за умови, що системи сповіщення про пожежу спрацюють без відмов і буде проведена на високому рівні організаційна робота по евакуації в умовах надзвичайної ситуації (пожежа), то в цьому

випадку всі працюючі цеху будуть евакуйовані із зони пожежі в небезпечне місце.

Розглянемо *другу пожежну ситуацію* з прогнозованим осередком *кутової пожежі (180°) у відділенні лакування* (осередок займання 2 знаходиться в осях А-Б і між колонами 18-19 – рис.2.4). Результати моделювання пожежі на 6 хв зображено на рис. 2.9. Аналізуючи результати моделювання прогнозованої пожежі, можна зробити такі висновки. За 6 хв пожежа розповсюдилась не тільки по лакувальному відділенню, а і в відділення фарбування та почала через проходи огорожувальних конструкцій цих відділень переходити до відділень облицювання і пакування, тобто на основну площу цеху. На 8 хв полум'я пожежі розповсюджується на комору шпону і далі на місце складування сировини та дільницю механічної обробки (рис. 2.10).

За 13 хв пожежа розповсюдилася до складу готової продукції з оточенням і проникненням до місця складування готової продукції. Тільки на 20 хв пожежею був охоплений весь цех.

За допомогою математичної моделі пожежі були отримані числові значення чинників, які впливають на тривалість критичного часу пожежі:

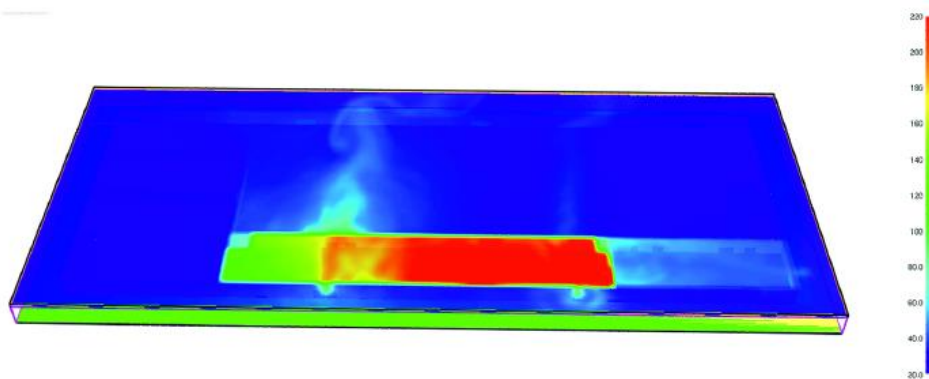


Рис. 2.9. Розповсюдження кутової пожежі (180°) лакувального відділення по лакувальному і фарбувальному відділеннях на 6-й хв



1) критична для людини температура, яка не перевищує  $70^{\circ}\text{C}$ , виникла за повних **8 хв** пожежі на загальній площі  $1836\text{ м}^2$  в осях Г-Д між колонами 1-8 та в осях В-Д між колонами 8-14 з двома евакуаційними виходами;

2) критичне значення густини  $\text{O}_2$  утворилося в цеху на цій же площі за **7 хв**;

3) гранично допустиме значення двоокису вуглецю на вказаних евакуаційних проходах утворилося за **10 хв**, а оксиду вуглецю за цей час було в межах допустимого значення;

4) гранично допустиме значення оптичної густини диму для нормального переміщення людей вздовж евакуаційних проходів цеху утворилося за **9 хв**.

У другій пожежній ситуації критичний час пожежі становить  $\tau_k=7\text{ хв}$ , тобто він збільшився на 32% у порівнянні з першою пожежною ситуацією, що забезпечує успішну евакуацію працюючих через два евакуаційні виходи, які розміщені в межах колон 1-14 зі збором працюючих для евакуації на площі  $1836\text{ м}^2$  лівої половини цеху, на якій відсутні безпечні чинники пожежі.

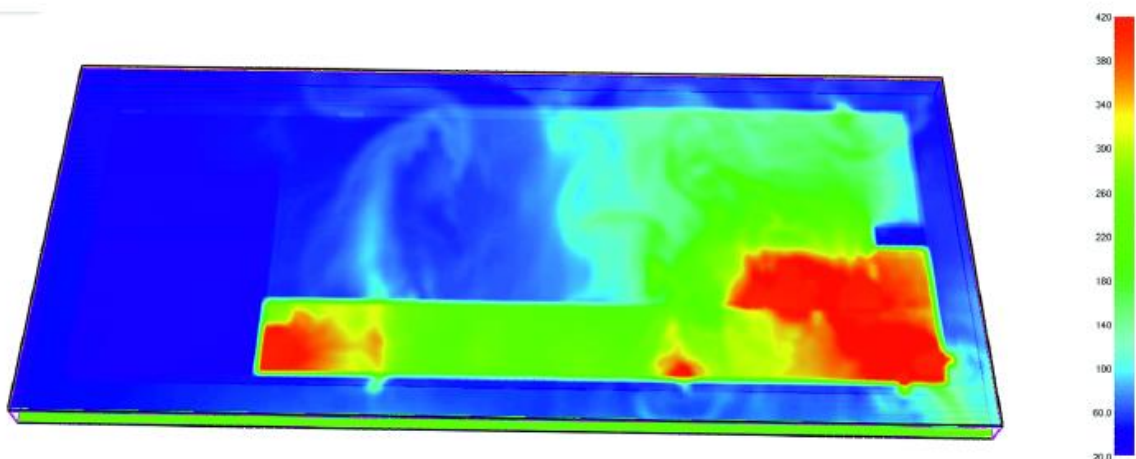


Рис. 2.10. Розповсюдження кутової пожежі ( $180^{\circ}$ ) лакувального відділення по площі цеху на 8-й хв

Збільшення критичного часу пожежі у другій пожежній ситуації можна пояснити тим, що пожежа виникла за огорожувальними конструкціями, які значно зменшують швидкість розповсюдження полум'я. Наприклад,

швидкість розповсюдження полум'я по цеху у другій пожежній ситуації склала 4,8 м/хв.

Розглянемо *третю пожежну ситуацію* з прогнозованим осередком *кутової пожежі (180°) на складі готової продукції* (осередок займання 3 знаходиться в осях Б-В і між колонами 1-2 – рис.2.4). Результати аналізу моделювання прогнозованої пожежі дозволили зробити такі висновки. На 6-й хв пожежа розповсюдилась по всьому складу готової продукції і почала переходити до місця складування готової продукції. Тільки на 10-й хв пожежа з місця складування через прохід в огорожувальній конструкції почала виходити до основної площі цеху. Після цього пожежа розповсюджується від 8 колони до 17 за 8,4 хв зі швидкістю 6,4 м/хв. Таким чином, за 18,4 хв пожежею охоплена ліва половина цеху, а за 33,4 хв – весь цех. Евакуацію працюючих в цьому випадку треба виконувати з правої сторони цеху з використанням одного евакуаційного виходу між колонами 29-33 та двох допоміжних з відділення облицювання. Критичний час пожежі в цьому випадку обмежується зменшенням густини кисню до критичного значення за 13,5 хв, що повністю забезпечує успішну евакуацію працюючих цеху. У третій пожежній ситуації критичний час пожежі становить  $\tau_k=13,5$  хв, тобто він збільшився у 2,5 рази у порівнянні з першою пожежною ситуацією. Підтвердженням збільшення критичного часу пожежі знову є огорожувальні конструкції, які значно зменшують швидкість розповсюдження полум'я.

*Результати моделювання пожежних ситуацій* в закритих приміщеннях деревообробних підприємств з використанням польового методу показали:

- найбільша швидкість розповсюдження пожежі в цеху відбувається у випадку її виникнення в центральній частині приміщення при відсутності огорожуючих протипожежних конструкцій;

- результати аналізу часу розповсюдження пожежі в закритому приміщенні деревообробного підприємства при різних пожежних ситуаціях показали, що швидка і своєчасна ліквідація пожежі пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС практично неможлива, тому що час до початку роботи перших пожежних стволів значно більший ніж час розповсюдження пожежі по всьому приміщенню. Тому необхідно при таких підприємствах організувати добровільні пожежно-рятувальні підрозділи для ліквідації пожежі з відповідними технічними засобами;
- в приміщеннях деревообробних підприємств необхідно влаштовувати протипожежні огорожуючі конструкції (протипожежні відсіки) з відповідними проходами і проїздами, що дозволить зменшити швидкість розповсюдження полум'я по цеху в декілька разів;
- З метою проведення успішної евакуації працюючих з приміщення, в якому виникла пожежа, необхідно його споряджувати пожежними сповіщувачами і оповіщувачами та достатньою кількістю евакуаційних виходів. Крім цього, необхідно розробляти евакуаційні плани для працюючих у залежності від можливого виникнення пожежної ситуації.

#### **2.4. Вплив пожежних відсіків цехів деревообробних підприємств на швидкість розповсюдження пожежі та оптимізація їх розмірів**

Відомо, що пожежний відсік - це частина будівлі, що виділяється протипожежними перешкодами (стінами, зонами, перекриттями) з метою обмеження можливої площі пожежі і забезпечення умов для його ліквідації. Виконання пожежних відсіків обумовлено великими розмірами сучасних виробничих і цивільних будівель, в яких знаходяться значні матеріальні цінності з горючих матеріалів, особливо на деревообробних підприємствах, що може привести при їх відсутності до значних матеріальних збитків від

пожежі. До того ж до теперішнього часу відсутні методи визначення оптимальних розмірів площ пожежних відсіків, що в ряді випадків призводить до виникнення проблеми, яка гальмує проектування і будівництво різних виробничих будівель і споруд.

Питання, що стосуються визначення розмірів пожежних відсіків, розглянуті в зводі правил СП 2.13130.2012 «Забезпечення вогнестійкості об'єктів захисту», затверджених наказом МНС Росії від 21.11.12 №693. У цьому документі площа пожежного відсіку вибирається залежно від категорії будинку або пожежного відсіку, поверховості будівлі і ступеня його вогнестійкості, а також від класу його конструктивної небезпеки.

Обґрунтуванню розмірів пожежних відсіків присвячено багато робіт, в тому числі А.Н. Баратова, В.П. Дьяконова, Ю.В. Кривцова та інших. Однак до теперішнього часу не встановлені критерії для оцінки прийнятих розмірів пожежних відсіків. У деяких роботах, наприклад Д.Г. Проніна [107, 108] обґрунтовуються розміри пожежних відсіків з використанням пожежних ризиків. Такий підхід носить суб'єктивний характер. При розгляді питань, пов'язаних з розмірами пожежних відсіків, також приділялася увага їх вогнестійкості. В цьому напрямку внесли значний вклад І.Ф. Астахова, І.С. Молчадський [168], С.В. Пузач [72], С.Л. Фомін [169] та інші.

Таким чином, в достатній мірі ще не встановлені критерії для прийняття оптимального рішення щодо розподілу будівель і споруд на пожежні відсіки, що обумовлює необхідність розробки методу оптимального нормування їх розмірів, особливо для цехів деревообробних підприємств, які виготовляють вироби з горючих матеріалів.

Тому ставиться задача розробити метод визначення оптимальних розмірів пожежних відсіків одноповерхових будівель виробничих цехів деревообробних підприємств.

При розгляді 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 в своєрідних пожежних відсіках. Тоді для розміщення пожежних відсіків залишається площа цеху, на якій розміщено виробниче обладнання та відповідні виробничі ділянки. В цьому випадку вивільняється площа цеху  $S$  для розміщення пожежних відсіків може бути визначена з використанням залежності

$$S = S_{\sigma} - \sum_{i=1}^n S_i, \quad (2.15)$$

де  $S_{\sigma}$  – 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 ізолювані від загальної виробничої площі цеху.

Ставиться задача визначити оптимальні розміри пожежних відсіків, які можна розмістити на виробничій площі цеху  $S$ . Для вирішення цього завдання необхідно використовувати оптимізаційну математичну модель, що дозволяє визначити оптимальні розміри пожежних відсіків [5].

На *першому* етапі визначаємо кількість пожежних відсіків  $\Pi$ , які можна розмістити на виробничій площі  $S$  цеху

$$\dot{\Pi} = \frac{S}{S_{i,i}}, \quad (2.16)$$

де  $S_{n,o}$  – нормативне значення площі пожежного відсіка,  $\text{м}^2$  [170].

Розрахункове значення  $\Pi$  округлити до цілого числа і приймаємо дійсне значення  $\Pi_0$ .

На *другому* етапі визначаємо дійсне значення площі  $S_{\sigma,o}$  кожного пожежного відсіку

$$S_{\sigma,i} = \frac{S}{\dot{\Pi}_i}. \quad (2.17)$$

На *третьому* етапі визначаємо площі  $S_{y,i}$  виробничих ділянок і їх розміщення в пожежних відсіках, які розміщуються на вивільненій виробничій площі  $S$  цеху. При цьому пожежні відсіки за номерами розміщуємо згідно виробничого процесу, що протікає в цеху, тобто відсік  $O_1$  розміщується на початку виробничого процесу, а відсіки  $O_{m-1}, O_m$  - в кінці процесу,  $m$  - загальна кількість номерів послідовно розміщених відсіків

$$\sum_{i=1}^q S_{o,i} = \gamma S, \quad (2.18)$$

де  $q$  – загальна кількість виробничих ділянок, які розміщуються на вивільненій виробничій площі  $S$  цеху;  $\gamma$  - коефіцієнт, який враховує проходи і проїзди на виробничих ділянках;  $\gamma = 0,7 \dots 0,8$  [42].

На *четвертому* етапі складаємо оптимізаційну математичну модель для визначення розмірів пожежних відсіків.

Функція мети

$$S_{\bar{a},i} \Rightarrow \max; \quad (2.19)$$

за критерієм

$$|S_{i,i} - S_{\bar{a},i}| \Rightarrow \min; \quad (2.20)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq S_{i,i} \leq b_1; \quad (2.21)$$

$$a_2 \leq \bar{I}_{\bar{a},i} \leq b_2; \quad (2.22)$$

$$S_{\bar{a},i} \bar{I}_{\bar{a},i} \geq \gamma S; \quad (2.23)$$

$$S_{\bar{a},i} \bar{I}_{\bar{a},i} \leq S; \quad (2.24)$$

$$p_i \geq [p], \quad (2.25)$$

де  $a_1$  – мінімальне значення нормативної площі пожежного відсіку,  $m^2$ ;  $a_1 = 0,9S_{н.о}$  [170];  $b_1 = 1,1S_{н.о}$  – максимальне значення нормативної площі пожежного відсіку,  $m^2$  [170];  $a_2$  – значення  $\Pi_{o,i}$ , розраховане з використанням

залежності (2.16) та заокруглене до цілого числа в меншу сторону;  $b_2$  – значення  $\Pi_{\delta,i}$ , розраховане з використанням залежності (2.16) та заокруглене до цілого числа в більшу сторону; в разі отримання відповідно до залежності (2.16) цілого числа  $\Pi_{\delta,i}$  необхідно для визначення  $a_2$  від  $\Pi_{\delta,i}$  відняти одиницю, а для визначення  $b_2$  – додати одиницю;  $p$  – ймовірність попадання досліджуваної точки в область допустимих рішень;  $p = k/N$ ,  $k$  – число точок (циклів роботи комп'ютера), які потрапили в область допустимих рішень,  $N$  – загальне число циклів роботи комп'ютера при вирішенні задачі;  $[p]$  – допустиме значення ймовірності попадання досліджуваної точки в область допустимих рішень.

Для вирішення оптимізаційної моделі і визначення розмірів пожежних відсіків скористаємося методом Монте-Карло [171]. Область допустимих рішень, яка визначається обмеженнями (2.21) ... (2.24), оточують  $m$ -мірним параллелепіпедом, в якому проводимо дослідження. Поставлену задачу найкраще вирішувати з використанням ПЕОМ. За допомогою датчика комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел  $\mu_i$  в інтервалі  $0 \dots 1$ . Для перетворення псевдовипадкових чисел  $\mu_i$ , які рівномірно розподілені в інтервалі  $0 \dots 1$ , до значень  $S_{n.o.i}$  та  $\Pi_{\delta,i}$  використовуємо залежності

$$S_{i.i.s} = a_1 + \mu_{1i}(b_1 - a_1); \quad (2.26)$$

$$\dot{I}_{\ddot{a}.s} = a_2 + \mu_{2i}(b_2 - a_2). \quad (2.27)$$

Блок-схема алгоритму рішення оптимізаційної математичної моделі визначення оптимальних розмірів пожежних відсіків зображена на рис. 2.11.

Після введення вихідних даних в блоці 1 виконується занулювання циклів роботи системи в блоці 2 і генерування псевдовипадкових чисел в блоці 3. Отримані псевдовипадкові числа перетворюються в блоці 4 до значень  $S_{n.o.i}$  та  $\Pi_{\delta,i}$  за залежностями (2.26) і (2.27). Крім того, значення

кількості пожежних відсіків в цьому блоці необхідно округлити до цілого числа: якщо значення  $P_{\delta,i}$  після цілого числа матиме значення менше або дорівнює 0,5, то округлити в меншу сторону до цілого числа; якщо значення  $P_{\delta,i}$  після цілого числа буде більше 0,5, то округлити в більшу сторону до цілого числа. У цьому ж блоці відповідно до залежності (2.17) визначають дійсне значення площі  $S_{\delta,o,i}$  пожежного відсіка.

У блоці 5 виконується присвоєння кожного наступного циклу рішення задачі. У 6 і 7 блоках здійснюється перевірка обмежень (2.23) і (2.24). У разі невиконання умов (2.23) і (2.24) цикл рішення задачі переривається і починається рішення з блоку 3.

У блоці 8 визначається значення критерію для оцінки отриманого результату, а в блоці 9 перевіряється порядковий номер циклу роботи комп'ютера при вирішенні задачі. У разі, якщо виконується тільки перший цикл, рішення задачі переривається в блоці 9 і починається рішення з блоку 3. Це пояснюється тим, після першого циклу відсутні дані для порівняння отриманого значення критерію з попереднім.

Блок 10 призначений для перевірки поточного значення критерія з попереднім. У випадки невиконання умови, рішення задачі переривається в блоці 10 і починається рішення з блоку 3. У блоці 11 виконується присвоєння кожного наступного циклу  $k_i$  продовження виконання завдання. У 12 блоці визначається значення ймовірності попадання точки в область допустимих рішень. Перевірка умови того, що певне значення ймовірності  $p_i$  більше або дорівнює значенню виконується в блоці 13. Якщо умова не виконується, то рішення задачі починається з блоку 3. Блок 14 здійснює роздрук результатів розрахунку.

Для реалізації оптимізаційної моделі визначення оптимальних розмірів пожежних відсіків для цехів деревообробних підприємств був розроблений для ПЕОМ пакет прикладних програм на мові C<sup>#</sup> для роботи в середовищі Windows XP. Оптимізація визначення розмірів пожежних відсіків виконується згідно послідовності, яка зображена на блок-схемі алгоритму



(рис. 2.11), на ПЕОМ. Час роботи ПЕОМ становить 5-7 с для 5 тисяч випробувань ( $N_i$  - циклів).

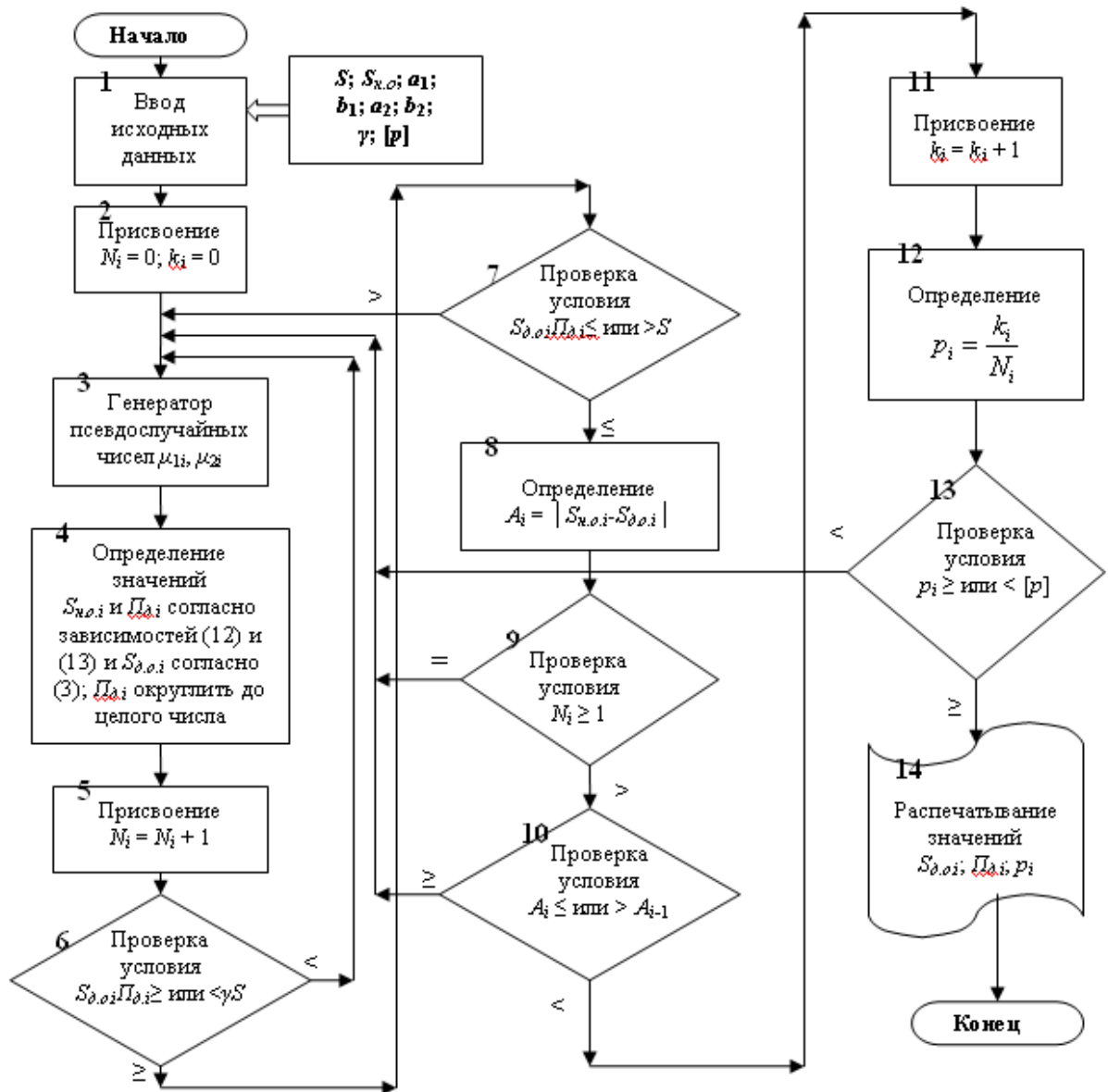


Рис. 2.11. Блок-схема алгоритму визначення оптимальних розмірів і кількості пожежних відсіків

Лістинги пакету прикладних програм для визначення оптимальних розмірів і кількості пожежних відсіків наведені у додатку 2. Роботу пакету прикладних програм продемонструємо на прикладі.

**Приклад.** Визначити кількість і оптимальні розміри пожежних відсіків для опоряджувально-складального цеху деревообробного підприємства (м Самбір, Львівська область, вул. В. Чорновола, 36). Ширина цеху - 72 м,

довжина цеху з кроком колон 6 м - 192 м, загальна площа цеху -  $S_u = 14256 \text{ м}^2$ ; висота цеху до ферм - 6 м. Сумарна площа ділянок підвищеної пожежної небезпеки  $\sum_{i=1}^n S_i = 5184 \text{ м}^2$ , які відділені від загальної площі цеху

протипожежними захисними стінами. Нормативна площа пожежного відсіку  $S_{н.о} = 3500 \text{ м}^2$  (будівля одноповерхова категорії Б, IV ступеня вогнестійкості, клас конструктивної пожежної небезпеки C0).  $\gamma = 0,7$ ;  $[p] = 0,5$ ;  $a_1 = 0,9S_{н.о} = 3150 \text{ м}^2$ ;  $b_1 = 1,1S_{н.о} = 3850 \text{ м}^2$ ;  $a_2 = 2$ ;  $b_2 = 3$ ;  $S = 14256 - 5184 = 9082 \text{ м}^2$ .

Після введення вхідних даних був отриманий результат (рис. 2.12):  $S_{д.о} = 3027,33 \text{ м}^2$ ; кількість пожежних відсіків  $\Pi_0 = 3$ ;  $p_i = 0,5$ .

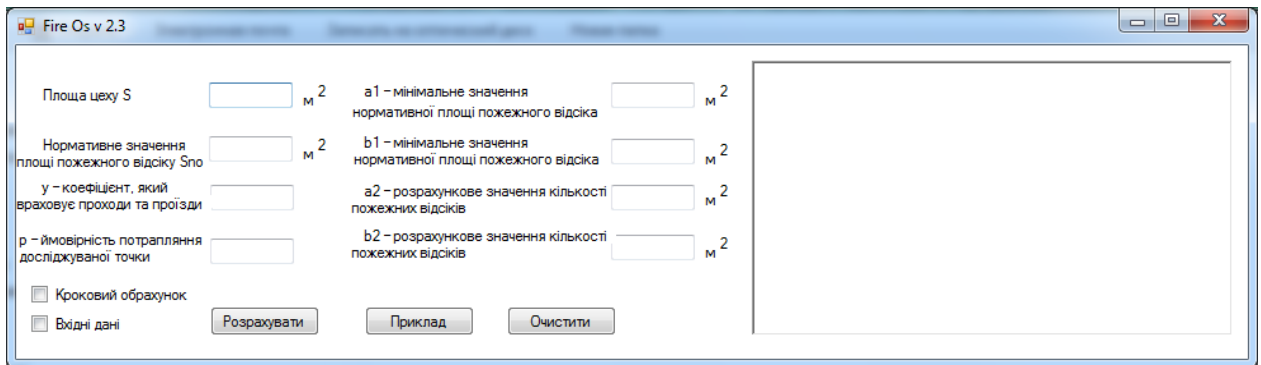


Рис. 2.12. Загальний вигляд робочого вікна програми для визначення кількості і оптимальних розмірів пожежних відсіків

Наявність пожежних відсіків в приміщенні цеху значно зменшує швидкість розповсюдження полум'я пожежі. Для врахування цього зменшення розглянемо це питання на прикладі цеху, ділянки якого відокремлені перегородками з цегли, вогнестійкості яких дорівнюють REI60. Кожна ділянка має вільний вихід на центральний проїзд цеху. Розглянемо випадок, коли на одній ділянці виникла кутова пожежа ( $90^\circ$ ;  $\alpha = 0,785$ ) пожежної ситуації 2(0; B) (рис. 2.13). Загальна площа цієї ділянки (ширина 30 м; довжина до центрального проїзду 34 м) складає  $1020 \text{ м}^2$ , лінійна швидкість розповсюдження полум'я  $V_l = 0,022 \text{ м/с}$  [55], тривалість вільного розвитку пожежі  $\tau_{в.з} = 35,9 \text{ хв}$ .

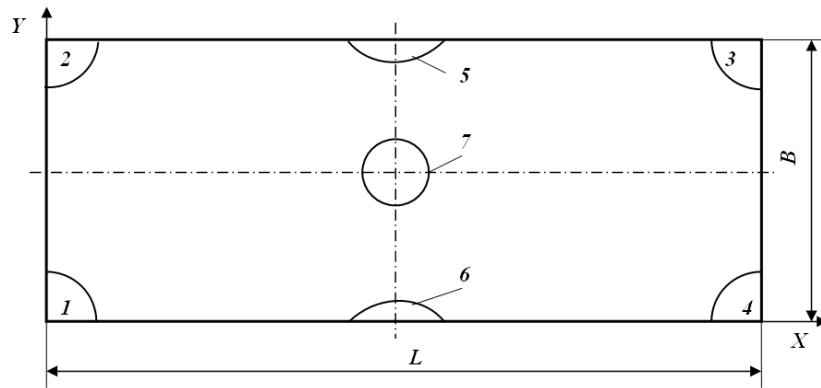


Рис. 2.13 – Схема приміщення цеха деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями і формами площі пожежі: 1, 2, 3, 4 – кутова форма (90°); 5, 6 – кутова форма (180°); 7 - кругова

У випадку, коли локалізація і гасіння пожежі безпосередньо на цій ділянці (позначимо умовно цю ділянку цифрою 2) не відбудуться, то імовірність виходу пожежі з цієї ділянки на центральний проїзд буде дорівнювати  $P_{2ц} = 1$ . Імовірність розповсюдження пожежі по центральному проїзду при відсутності її локалізація і гасіння буде також дорівнювати  $P_{ц} = 1$ . Далі пожежа може перейти з центрального проїзду на рядом розміщену сусідню ділянку і протилежно розміщену (позначимо їх відповідно цифрами 5 і 1) з імовірностями  $P_{5ц} = 1$  і  $P_{2ц} = 1$ . Але у випадку початку локалізації пожежі на ділянці 2 на той час, коли вона ще не вийшла за її межі, можливий тільки один варіант переходу пожежі на ділянку 5, а саме через протипожежну перегородку, яка має вогнестійкість **REI60**. Для визначення імовірності можливого переходу пожежі з ділянки 2 на ділянку 5 через протипожежну перегородку скористуємося основними положеннями теорії надійності [173].

В цьому випадку маємо, наприклад за  $\tau_{e,2} = 35,9$  хв, згідно із експоненціальним законом розподілу [173] імовірність  $P_{25}$  переходу пожежі з ділянки 2 до ділянки 5 через протипожежну перегородку визначаємо за залежністю

$$P_{25} = 1 - \exp(-\lambda \tau_{a,\bar{a}}), \quad (2.28)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$$\lambda = \frac{1}{\bar{O}_A}; \quad (2.29)$$

$T_B$  – тривалість вогнестійкості,  $\text{хв}$ .

Тоді, з урахуванням залежностей (2.28) і (2.29), отримаємо

$$P_{25} = 1 - e^{-\frac{\tau_{\bar{a}, \bar{a}}}{\bar{O}_A}} = 1 - 2,718^{-\frac{35,9}{60}} = 0,45.$$

Визначимо сумарну імовірність  $P_{\Sigma}$  розповсюдження пожежі між дільницями цеху з використанням протипожежних перегородок і без них за залежністю

$$P_{\Sigma} = P_{2\bar{o}} \cdot D_{\bar{o}} \cdot D_{1\bar{o}} \cdot D_{3\bar{o}} (1 - D_{25}) = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 (1 - 0,45) = 0,55.$$

В цьому випадку використання протипожежних перегородок зменшує швидкість розповсюдження пожежі по приміщенню цеху приблизно в

$$\xi = \frac{1}{P_{\Sigma}} = \frac{1}{0,55} = 1,8 \text{ рази.}$$

*Результати розгляду визначення кількості і оптимізації розмірів пожежних відсіків та їх вплив на швидкість розповсюдження пожежі показали:*

- кількість пожежних відсіків та їх оптимальна площа залежать від площі цеху, на якій розміщено обладнання та устаткування, що не захищено від вільного розповсюдження пожежі;
- точність визначення оптимальної площі пожежі залежить від прийнятої імовірності попадання досліджувальних точок в область допустимих розв'язків оптимізаційної задачі;

- наявність в цеху пожежних відсіків зменшує швидкість розповсюдження пожежі в 1,8 рази.

## **2.5. Висновки**

1. Прийнята та удосконалена для дослідження пожежних ситуацій в деревообробному цеху система FDS дозволяє визначати критичний час пожежі, швидкість розповсюдження пожежі, температурні поля та виділення диму і токсичних речовин.

2. Найбільша швидкість розповсюдження пожежі, як показали результати досліджень, має місце у випадку виникнення кругової пожежі в центральній частині цеху. Це пояснюється тим, що довжина шляху її розповсюдження скорочується в два рази.

3. Результати досліджень тривалості розповсюдження пожежі в закритому приміщенні деревообробного цеху загальною площею 14256 м<sup>2</sup> при різних пожежних ситуаціях показали, що в залежності від місця виникнення пожежі вся площа цеху може бути охоплена пожежею в межах 15...33,4 хв. В межах цього часу неможливо провести ліквідацію пожежі пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС. Тому рекомендується на деревообробних підприємствах організувати добровільні пожежно-рятувальні служби, які зможуть у випадку виникнення пожежі розпочати її ліквідацію до приїзду пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС.

4. Розроблена оптимізаційна математична модель і пакет прикладних програм для визначення кількості і площі пожежних відсіків в закритих приміщеннях деревообробних цехів, які дозволяють розраховувати оптимальну площу пожежного відсіка та їх кількість.

5. Доказано, що використання пожежних відсіків зменшує швидкість розповсюдження пожежі в закритому приміщенні цеху в 1,8 рази.

### **РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖНИХ СИТУАЦІЙ РОЗВИТКУ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ НА ВІДКРИТИХ СКЛАДАХ ЛІСОМАТЕРІАЛІВ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

#### **3.1. Основні конструктивні особливості відкритих складів лісоматеріалів деревообробних підприємств та постановка завдання**

Найбільш небезпечними пожежами є пожежі на відкритих складах лісоматеріалів. Такі пожежі у більшості випадків мають вигляд масової пожежі. Вивчення пожеж і способів їх гасіння на відкритих складах лісоматеріалів було розпочате, наприклад, в Росії в 50 - 60 роки минулого століття з використанням результатів експериментальних досліджень на натурних об'єктах. Узагальнення цих результатів було опубліковане в роботах [139, 140]. Пожежі на складах лісоматеріалів характеризуються розкидом іскр і головешок на значні відстані, радіус яких залежить від висоти їх підйому конвективною колонкою і швидкості вітру [68]. Автори вказаних робіт вказують, що середня швидкість поширення вогню при пожежі на складах круглого лісу складає 0,23.0,36 м/хв.

В цей же час по розвитку і поширенню пожеж на відкритих складах пиломатеріалів були розглянуті результати робіт на 10-му Симпозіумі по процесах горіння на пожежах в 1965 році в Пітсбурзі (США). Результати досліджень, які були представлені в роботі [307], розглядали механізм поширення пожежі на відкритих складах лісоматеріалів у вигляді поширення іскр і головешок, які горять і розлітаються під дією конвективної колонки. Цей механізм поширення пожежі на відкритих складах був розвинений в кандидатській дисертації М. С. Артемьева, яка була захищена в 1981 році в Москві (ВІПТШ).

За результатами робіт П. П. Девлишева і І.А. Іванова [74, 91] були отримані емпіричні залежності для визначення швидкості поширення фронту пожежі по штабелях на складах пиломатеріалів. Але ці залежності

неможливо використовувати для розрахунку швидкості поширення фронту пожежі по території складу пиломатеріалів, оскільки вони не враховують протипожежних розривів між штабелями.

З початку 80-х років у ВНДІПО (Росія) почали розробляти методи математичного моделювання розвитку пожеж на відкритих складах лісоматеріалів. При цьому розглядали поширення пожежі за рахунок теплової радіації, конвекції, а також перенесення іскор і головешок вітром [133].

Аналіз робіт по визначенню швидкості поширення фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів штабельного зберігання показує, що на сьогодні відсутня вдосконалена методологія її визначення. Тому ставиться завдання, рішення якого в деякій мірі дозволить ліквідувати цей недолік, а отримані результати дадуть можливість розробити додаткові заходи протипожежної безпеки на цих складах.

За основу при розгляді конструктивних особливостей відкритих складів лісоматеріалів приймаємо рекомендації [220]. На підставі рекомендацій [220] розглянемо план розташування штабелів одного квартала складу пиломатеріалів (рис. 3.1).

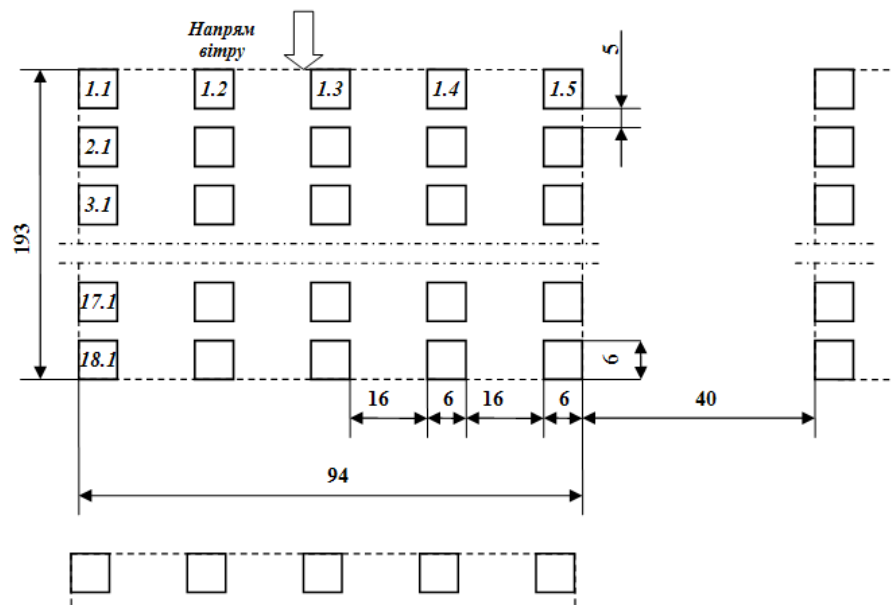


Рис. 3.1. План відкритого складу пиломатеріалів

Основні параметри одного квартала склада пиломатеріалів: штабелі розміром  $b \times l \times h = 6 \times 6 \times 5$  м; ширина повздовжніх розривів між штабелями  $b_{нов} = 16$  м; ширина поперечних розривів між штабелями  $b_{нон} = 5$  м; загальна кількість повздовжніх рядів квартала 5 сумарною шириною 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною 193 м; загальна площа квартала  $18142 \text{ м}^2 \approx 1,8$  га; протипожежні розриви між кварталами при висоті штабелів 5 м дорівнюють 40 м.

На підставі розглянутих рекомендацій план розташування штабелів одного кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання зображений на рис. 3.2.

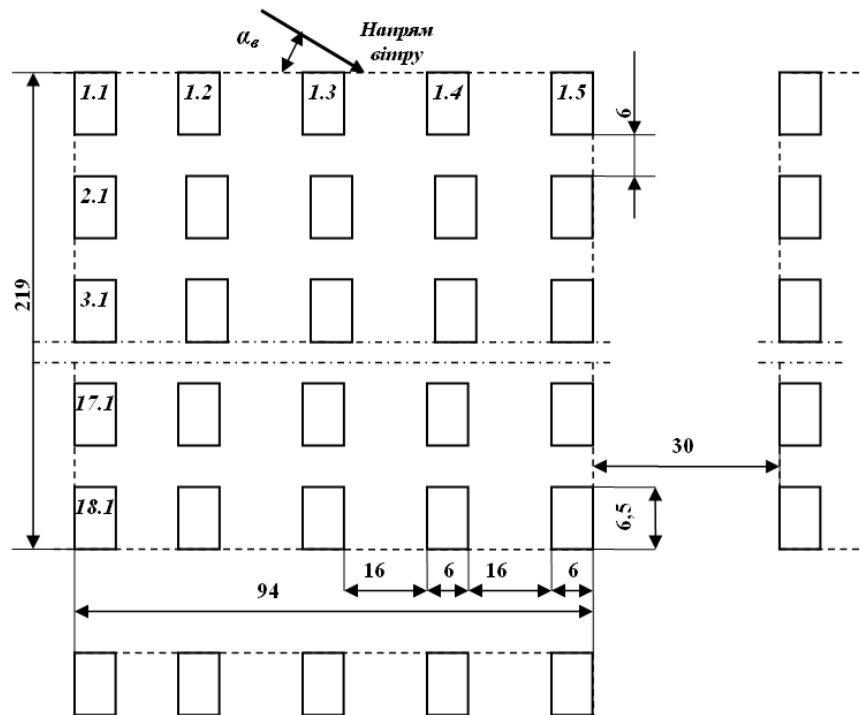


Рис. 3.2. План кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання

Основні параметри кварталу складу круглих лісоматеріалів: штабелі згідно рекомендацій [67] розміром  $b \times l \times h = 6 \times 6,5 \times 6$  м; ширина повздовжніх розривів між штабелями  $b_{нов} = 16$  м; ширина поперечних розривів між штабелями  $b_{нон} = 6$  м; загальна кількість повздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною



довжиною 219 м; загальна площа кварталу  $20586 \text{ м}^2 \approx 2 \text{ га}$ ; протипожежні розриви між кварталами при висоті штабелів 6 м дорівнюють 30 м.

### 3.2. Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі на складах пиломатеріалів

Для розгляду задачі визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі в залежності від пожежних ситуацій на відкритих складах пиломатеріалів скористуємося методологією та результатами, які наведені в роботах [106, 74, 91, 134]. На підставі даних робіт швидкість розповсюдження фронту полум'я  $V_{II}$  по одному штабелю

$$V_{II} = \frac{7,5\psi_n}{K_\rho \omega (Kh)^{0,33} (KL_\phi)^{0,2}} \left[ 1 + \frac{0,016V_g K_\rho \omega (Kh)^{0,33} (KL_\phi)^{0,2}}{7,5\psi_n} \right], \text{ м/с} \quad (3.1)$$

де  $\psi_n$  – питома швидкість вигорання,  $\text{кг/м}^2\text{с}$ ;  $K_\rho$  – густина укладки пиломатеріалів;

$$K_\rho = \frac{V_\partial}{V_{II}}; \quad (3.2)$$

$V_\partial$  – об'єм деревини в штабелі,  $\text{м}^3$ ;  $V_{II}$  – об'єм штабеля пиломатеріалів ( $b \times l \times h$ ),  $\text{м}^3$ ;  $\omega$  – вологість деревини, %;  $K$  – величина поверхні деревини в одиниці об'єма штабеля,  $\text{м}^2$ ;

$$K = (1\text{м}^2)2zK_\rho, \text{ м}^2; \quad (3.3)$$

$z$  – кількість рядів пиломатеріалу на висоті 1 м;  $h$  – висота штабеля, м;  $V_g$  – швидкість вітру,  $\text{м/с}$ ;  $L_\phi$  – довжина фронту полум'я, м.

Час  $\tau_{II}$ , за який верхня площина штабеля буде охоплена полум'ям визначаємо за залежністю

$$\tau_{ш} = \frac{l}{V_{II}}, \text{ с.} \quad (3.4)$$

Згідно даних роботи [106], для розповсюдження пожежі по штабелях від теплового випромінювання факела полум'я одного штабеля необхідно визначити густину потоку  $q_p$  результуючого випромінювання від штабеля, який горить

$$q_p = \frac{\sigma(T_{\phi}^4 - T_{\delta}^4)}{\frac{1}{A_{\phi}} + \frac{1}{A_{\delta}} - 1 + \frac{3\bar{\alpha}x}{4}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.5)$$

де  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$  – стала Стефана – Больцмана;  $T_{\phi}$  – температура факела, К;  $T_{\delta}$  – температура займання деревини, К (згідно із даними [238] 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 [79];  $A_{\delta} = 0,6$  – ступінь чорноти деревини штабеля [133];  $\bar{\alpha}$  – осереднений за спектром коефіцієнт поглинання середовища (за даними роботи [50]  $\bar{\alpha} = 0,45/l_c$ , де  $l_c$  – найбільша товщина шару середовища між сусідніми штабелями, м);  $x$  – дійсна відстань між штабелями, м.

Після цього визначаємо температуру на боковій поверхні сусіднього штабеля, який знаходиться рядом зі штабелем, що горить

$$T_{ш} = \frac{q_p S_{\epsilon}}{\alpha_{ш} S_{ш}} + T_0, \text{ К} \quad (3.6)$$

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

Після визначення  $T_{ш}$ , його значення порівнюють з температурою займання деревини  $T_{\partial}$ . У випадку коли  $T_{ш} \geq T_{\partial}$  сусіднього штабеля, то пожежа переходить на цей штабель.

Поставлену проблему будемо розв'язувати в два етапи: 1) визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі  $V_{\phi}$  на відкритих складах пиломатеріалів на основі побудови графових моделей; 2) визначення впливу швидкості вітру  $V_{\epsilon}$  на швидкість розповсюдження фронту пожежі  $V_{\phi}$  на відкритих складах пиломатеріалів.

Розглянемо розв'язок етапів поставленої проблеми на наступному прикладі.

**Приклад.** Визначити швидкість розповсюдження фронту пожежі  $V_{\phi}$  на складі пиломатеріалів (рис. 3.1). В штабелях зберігаються бруски сосни густиною  $\gamma_{\partial} = 540 \text{ кг/м}^3$ , вологістю 8-9% з температурою займання  $T_{\partial} = 528 \text{ К}$ . Кількість брусків на 1 м висоти штабеля  $z = 10$  з густиною укладки пиломатеріалів  $K_p = 0,6$ . Основні параметри одного квартала склада: штабелі розміром  $b \times l \times h = 6 \times 6 \times 5 \text{ м}$ ; ширина повздовжніх розривів між штабелями  $b_{нов} = 16 \text{ м}$ ; ширина поперечних розривів між штабелями  $b_{нон} = 5 \text{ м}$ ; загальна кількість повздовжніх рядів квартала 5 сумарною шириною 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною 193 м; загальна площа квартала  $18142 \text{ м}^2 \approx 1,8 \text{ га}$ ; протипожежні розриви між кварталами при висоті штабелів 5 м дорівнюють 40 м. Можлива імовірність виникнення пожеж: **1) в центрі першого** поперечного ряду квартала на штабелі № 1.3; **2) в зовнішньому куті квартала** в першому поперечному ряду на штабелі № 1.5; **3) посередині повздовжнього крайнього** правого ряду на штабелі № 9.5; **4) в центрі квартала** на штабелі № 9.3. Швидкість вітру  $V_{\epsilon} = 4 \text{ м/с}$ , температура навколишнього середовища  $t = 293 \text{ К}$ , а поверхонь штабеля  $T_0 = 300 \text{ К}$ . За даними робіт [135, 198, 133]:  $Q_{\min} = 13800 \text{ кДж/кг}$ ;  $\psi_n = 0,0145 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ;  $c_p = 1,7 \text{ кДж/кгК}$ ;  $A_{\phi} = 0,9$ ;  $A_{\partial} = 0,6$ . Довжина фронту полум'я на штабелі  $L_{\phi} = 6 \text{ м}$ .

**Розв'язок.**

**Перший етап** – визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі.

1. Визначаємо величину площі поверхні деревини в одиниці об'єма штабеля за залежністю (3.3)

$$K = (1m^2)2zK_p = (1m^2)2 \cdot 10 \cdot 0,6 = 12 \text{ м}^2.$$

2. Визначаємо швидкість поширення пожежі вздовж штабеля пиломатеріалів за вітром

$$V_{II} = \frac{7,5 \cdot 0,0145}{0,6 \cdot 9(12 \cdot 5)^{0,33}(12 \cdot 6)^{0,2}} \left[ 1 + \frac{0,016 \cdot 4 \cdot 0,6 \cdot 9(12 \cdot 5)^{0,33}(12 \cdot 6)^{0,2}}{7,5 \cdot 0,0145} \right] = 0,06 \text{ м/с.}$$

3. Визначаємо час  $\tau_{ш}$ , за який весь штабель буде охоплено полум'ям

$$\tau_{ш} = \frac{l}{V_{II}} = \frac{6}{0,06} = 100 \text{ с.}$$

4. Визначаємо температуру  $T_{\phi}$  факела.

Пожежне навантаження маси одного шару штабеля на його верхню площину з урахуванням загальної кількості шарів  $z_{ш}$  штабеля  $z_{ш} = zh$

$$G = \frac{h\gamma_0 K_p}{z_{ш}} = \frac{5 \cdot 540 \cdot 0,6}{50} = 32,4 \text{ кг/м}^2;$$

$$K_{ш} = \frac{2(bh + lh) + bl}{bl} - 1 = \frac{2(6 \cdot 5 + 6 \cdot 5) + 6 \cdot 6}{6 \cdot 6} - 1 = 3,3;$$

$$T_{\phi} = \frac{Q_{\min} \psi_n \tau_{ш} K_{ш}}{c_p G} = \frac{13800 \cdot 0,0145 \cdot 100 \cdot 3,3}{1,7 \cdot 32,4} = 1198 \text{ К.}$$

5. Визначаємо висоту осі конвективної колонки над штабелем при  $x = 3$  м і  $S_{II} = bl = 6 \cdot 6 = 36 \text{ м}^2$

$$H = 1,32 \sqrt[3]{x^2 \left( \frac{1,4 Q_{\min} \psi_n S_{II}}{t V_a^3} \right)^5} = 1,32 \sqrt[3]{3^2 \left( \frac{1,4 \cdot 13800 \cdot 0,0145 \cdot 36}{293 \cdot 4^3} \right)^5} = 0,98 \text{ м.}$$

6. Кут нахилу  $\alpha_k$  конвективної колонки відносно вертикальної осі

$$\alpha_k = \arctg(0,98/3) = 72^\circ.$$

7. Визначаємо густина потоку  $q_{p.нов}$  результуючого випромінювання вздовж повздовжнього ряду до сусіднього штабеля, який знаходиться на відстані  $x = 5$  м, за залежністю (3.5)

$$q_{p.нов} = \frac{5,7 \cdot 10^{-8} (1198^4 - 528^4)}{\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,6} - 1 + \frac{3 \cdot 0,45}{16} \cdot 5} = 60000 \text{ Вт/м}^2.$$

За аналогією для повздовжнього ряду визначаємо густина потоку  $q_{p.нон}$  вздовж поперечного ряду до сусіднього штабеля, який знаходиться на відстані  $x = 16$  м –  $q_{p.нон} = 53392 \text{ Вт/м}^2$ .

8. Визначаємо тепловий потік випромінювання вздовж повздовжніх і поперечних рядів штабелів. При цьому в нашому прикладі  $b = l$  для всіх штабелів, то площа поверхні, яка випромінює тепловий потік на поперечні і повздовжні ряди сусідніх штабелів, може визначатися так

$$S_a = l(h + H) = 6(5 + 0,98) = 35,88 \text{ м}^2.$$

Тоді

$$Q_{нов} = 10^{-3} q_{p.нов} S_a = 10^{-3} \cdot 60000 \cdot 35,88 = 2152,8 \text{ кВт};$$

$$Q_{нон} = 10^{-3} q_{p.нон} S_a = 10^{-3} \cdot 53392 \cdot 35,88 = 1915,7 \text{ кВт}.$$

9. Визначаємо усереднене значення коефіцієнта тепловіддачі за залежністю [106]

$$\alpha_{ui} = 0,0159 \left( \frac{blh\gamma_{\delta} K_{\rho}}{S_{\epsilon}} \right)^{0,222} = 0,0159 \left( \frac{6 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 540 \cdot 0,6}{35,88} \right)^{0,222} = 0,082 \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К}).$$

10. Визначаємо температуру на бокових поверхнях сусідніх штабелів вздовж повздовжніх  $T_{ui.нов}$  і поперечних  $T_{ui.нон}$  рядів за залежністю (3.6)

$$T_{ui.нов} = \frac{2152,8}{0,082 \cdot 30} + 300 = 1175 \text{ К};$$

$$T_{ui.нон} = \frac{1915,7}{0,082 \cdot 30} + 300 = 1078 \text{ К}.$$

11. Визначаємо час поширення пожежі на сусідні штабелі від штабеля № 1.3 в першому поперечному ряді, на якому виникла пожежа. Час охоплення полум'ям штабеля № 1.3 складає 100 с або 1,67 хв. Після цього часу теплове випромінювання діє на штабелі № 1.2 і № 1.4 першого ряду та на штабель № 2.3 другого ряду. Температура, яка діє на бокові поверхні штабелів № 1.2 і № 1.4 першого ряду дорівнює  $T_{ui.нон} = 1078 \text{ К}$ , а на штабель № 2.3 другого ряду –  $T_{ui.нов} = 1175 \text{ К}$ , що значно перевищує температуру займання деревини штабеля, яка дорівнює  $T_{\delta} = 528 \text{ К}$ . Але займання сусідніх штабелів буде проходити з деякою затримкою. Згідно даних роботи [50] час затримки спалаху враховують коефіцієнтом  $k = 0,4 \dots 0,6$ . В нашому прикладі при  $k = 0,4$  час займання  $\tau_3$  сусідніх штабелів після охоплення полум'ям штабеля № 1.3 буде через час, який дорівнює

$$\tau_3 = \frac{\tau_{ui}}{k} - \tau_{ui} = \frac{1,67}{0,4} - 1,67 = 2,5 \text{ хв.} \quad (3.7)$$

На підставі цих даних можна стверджувати, що від початку пожежі за час  $\tau_{II} = \tau_{ш} + \tau_3 = 1,67 + 2,5 = 4,17$  хв площа пожежі на складі пиломатеріалів буде  $S_{II} = 36 \text{ м}^2$ , а через час  $2\tau_{II} = 8,34$  хв –  $S_{II2} = 144 \text{ м}^2$  (горять штабелі № 1.2, 1.3, 1.4 першого ряду і № 2.3 другого ряду). Відповідно час  $3\tau_{II} = 12,51$  хв –  $S_{II3} = 288 \text{ м}^2$  (горять всі п'ять штабелів першого ряду і штабелі №2.2, 2.3, 2.4 другого ряду). Протягом часу  $4\tau_{II} = 16,68$  хв –  $S_{II3} = 468 \text{ м}^2$  (горять всі п'ять штабелів першого і другого рядів і штабелі №3.2, 3.3, 3.4 третього ряду) і т. д. За умов прикладу, який розглядається, вплив часу вільного горіння на площу пожежі, можна представити каскадним графом розповсюдження пожежі (рис. 3.3).

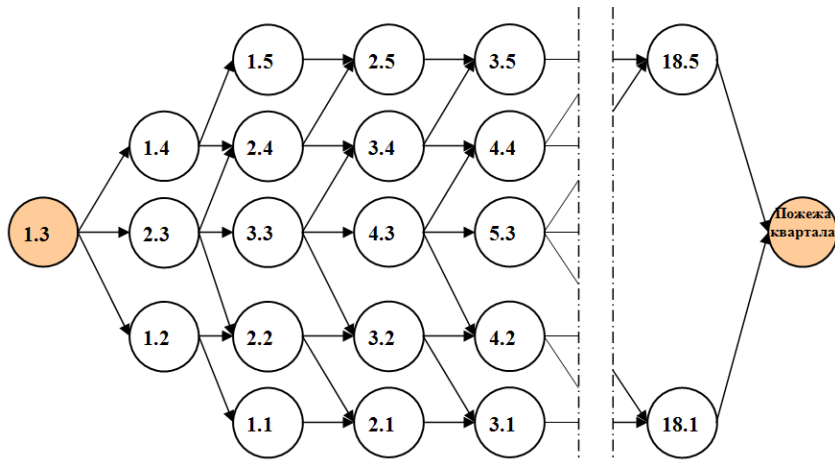


Рис. 3.3. Каскадний граф розповсюдження пожежі на кварталі складу пиломатеріалів при швидкості вітру  $V_B = 4 \text{ м/с}$

Вершини графа (рис. 3.3) 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 в нашому прикладі дорівнює  $\tau_{II} = 4,17$  хв. Результати аналізу каскадного графу розповсюдження пожежі показують, що на ньому можна виділити  $k_{ш} = 20$  груп штабелів, кожна з яких одночасно розповсюджує 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 положення можна визначити швидкість розповсюдження фронту пожежі по кварталу складу пиломатеріалів за залежністю

$$V_{\phi} = \frac{S_{в.п.ш} n_{ш}}{b n_{ш.п.р} \tau_{п} k_{ш}}, \text{ м/хв} \quad (3.8)$$

де  $S_{в.п.ш}$  – площа верхньої поверхні одного штабеля, м<sup>2</sup>;  $n_{ш}$  – загальна кількість штабелів в  $k_{ш}$  групах кварталу складу, які охоплені пожежею;  $n_{ш.п.р}$  – кількість штабелів в поперечних рядах  $k_{ш}$  груп кварталу складу, які охоплені пожежею.

На підставі розгляду каскадного графу розповсюдження пожежі на кварталі складу пиломатеріалів (рис. 3.3) та з використанням залежності (3.8) були виконані розрахунки для прикладу, який розглядається, швидкості розповсюдження фронту пожежі за умови імовірності виникнення пожежі в першому поперечному ряді квартала на штабелі № 1.3. Результати розрахунків зображені на рис. 3.4.

На підставі результатів аналізу графічної залежності (рис. 3.4) можна зауважити, що на початку виникнення пожежі довжина її фронту дорівнює тільки ширині штабеля  $b = 6$  м зі швидкістю фронту пожежі  $V_{\phi} = 1,5$  м/хв. На протязі часу до 10 хв фронт пожежі розширюється, а швидкість зменшується. Після досягнення довжини фронту пожежі ширини кварталу швидкість фронту пожежі починає зростати і під кінець тривалості вільного горіння ( $\tau_{в.г} = 4,17 \cdot 20 = 83,4$  хв), тобто до покриття пожежею всього кварталу, вона досягає  $V_{\phi} = 3,24$  м/хв при швидкості вітру  $V_{в} = 4$  м/с.

Аналогічні розрахунки та аналіз були виконані для випадків виникнення таких пожеж: *в зовнішньому куті квартала* першого



поперечному ряду на штабелі № 1.5; *посередині повздовжнього крайнього* правого ряду на штабелі № 9.5; *в центрі квартала* на штабелі № 9.3. Для наведених випадків можливих варіантів виникнення пожеж було встановлено, що швидкість розповсюдження фронту пожежі при її виникненні: на штабелі №1.5 коливається в межах  $V_{\phi} = 1,5 \dots 5,89$  м/хв при  $\tau_{в.г} = 91,7$  хв; на штабелі № 9,5 –  $V_{\phi} = 1,5 \dots 4,62$  м/хв при  $\tau_{в.г} = 58,4$  хв; на штабелі № 9.3 –  $V_{\phi} = 1,5 \dots 2,35$  м/хв при  $\tau_{в.г} = 45,9$  хв.

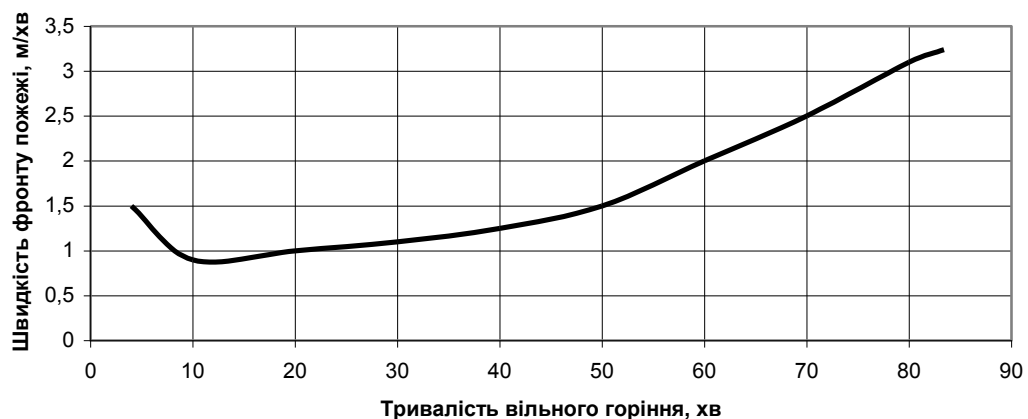


Рис. 3.4. Залежність швидкості фронту розповсюдження пожежі від тривалості вільного горіння (пожежа розпочалася на штабелі 1.3 при швидкості вітру  $V_{в} = 4$  м/с)

Отримані результати дозволяють зробити висновки про те, що місце виникнення пожежі на складі пиломатеріалів в значній мірі впливає на швидкість розповсюдження фронту пожежі та на тривалість вільного горіння. Наприклад, найбільша тривалість вільного горіння має місце при виникненні пожежі на зовнішньому куті, а найменша – в центрі квартала (приблизно в 2 рази). Зростання кінцевої швидкості розповсюдження фронту пожежі пояснюється тим, що кінцеве покриття пожежею склада проходить на меншій кількості штабелів. Наприклад, якщо пожежа виникає на зовнішньому куті, то закінчується на одному штабелі, а якщо в центрі квартала, то закінчується на п'яти штабелях.

### *Другий етап*

Для визначення впливу швидкості вітру  $V_e$  на швидкість розповсюдження фронту пожежі  $V_\phi$  на відкритих складах пиломатеріалів скористуємося залежностями (3.1), (3.4), (3.7) та значенням часу  $\tau_{II}$ . Розглянемо вплив швидкості вітру в межах  $V_e = 1 \dots 20$  м/с на швидкість розповсюдження фронту пожежі  $V_\phi$ . Для цього скористуємося залежністю

$$V_\phi = K_e V_{\phi,0}, \quad (3.9)$$

де  $K_e$  – коефіцієнт, який враховує вплив швидкості вітру на швидкість розповсюдження фронту пожежі;  $V_{\phi,0}$  – швидкість розповсюдження фронту пожежі при швидкості вітру  $V_e = 4$  м/с.

Результати розрахунків наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Значення коефіцієнта  $K_e$

<b>Швидкість вітру, м/с</b>	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<b>Значення <math>K_e</math></b>	0,3	0,52	1	1,45	1,97	2,42	2,88	3,48	3,94	4,39	4,85

Для спрощення використання даних для визначення значення коефіцієнта  $K_e$  рекомендується для інтерполяції значень використовувати залежність

$$K_e = 0,2365V_e + 0,1082. \quad (3.10)$$

Результати аналізу отриманих даних показує, що при збільшенні швидкості вітру, наприклад, в два рази швидкість розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів зростає майже в два рази.

Результати виконаних досліджень дозволили отримати такі результати:

- розроблена з використанням графових моделей методологія визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів, яка дає можливість в залежності від виду

пиломатеріалів і місця виникнення пожежі визначати час розповсюдження пожежі по кварталу складу пиломатеріалів та швидкість фронту пожежі;

- швидкість розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів зростає при наближенні її в кінець кварталу склада, що пояснюється охопленням в кінці пожежі меншої кількості штабелів.
- встановлено, що найбільша тривалість вільного розповсюдження пожежі має місце при її виникненні на зовнішньому куті, а найменша – в центрі квартала. Різниця в цьому випадку доходить до 2 разів;
- результати досліджень показали, що від початку пожежі на складі пиломатеріалів до 10-ї хвилини швидкість фронту пожежі зменшується за рахунок збільшення її фронту, а після досягнення фронту пожежі ширини кварталу швидкість фронту пожежі починає зростати і досягає максимального значення після охоплення пожежею всього кварталу складу;
- швидкість вітру в значній мірі впливає на швидкість розповсюдження фронту пожежі. При збільшенні швидкості вітру, наприклад, в два рази швидкість розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів зростає майже в два рази.

### **3.3. Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі на складах круглих лісоматеріалів**

Для визначення швидкості поширення фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів штабельного зберігання за основу приймаємо значення швидкості поширення полум'я по штабелю при пожежі, отримане на підставі результатів експериментальних досліджень у ВНДІПО (Росія) [135]. Згідно цих результатів швидкість поширення полум'я по штабелю круглих лісоматеріалів  $V_{II} = 0,0585$  м/с при швидкості вітру  $V_g = 0$  м/с і з

вологістю деревини 11...12%. Штабелі укомплектовані хвойними породами круглих лісоматеріалів довжиною 6,5 м і діаметром 18...20 см.

Використовуючи результати експериментальних досліджень М.П. Копилова про вплив вітру на швидкість поширення фронту полум'я по штабелю круглих лісоматеріалів [134], була отримана емпірична залежність для визначення найбільш вірогідної швидкості поширення полум'я по штабелю  $V_{Пв}$  з урахуванням швидкості вітру і кута його дії на штабель

$$V_{Пв} = V_{П} K_{г} K_{\alpha}, \quad (3.11)$$

де  $K_{г}$  - коефіцієнт, який враховує вплив швидкості вітру на швидкість поширення полум'я по штабелю

$$K_{г} = 0,9912 \exp(0,0388V_{г}); \quad (3.12)$$

$V_{г}$  - швидкість вітру, м/с;  $K_{\alpha}$  - коефіцієнт, який враховує вплив напрямку дії вектору швидкості вітру на швидкість поширення полум'я по штабелю

$$K_{\alpha} = -5 \cdot 10^{-5} \alpha_{г}^2 + 0,0123 \alpha_{г} + 0,374; \quad (3.13)$$

$\alpha_{г}$  - кут напрямку вітру (при  $\alpha_{г} = 90^{\circ}$  розглядається попутній напрям вітру, який співпадає з повздовжнім розміщенням штабелів кварталу (рис. 3.2); при  $\alpha_{г} = 270^{\circ}$  - зустрічний напрям вітру), град.

Для визначення часу  $\tau_{ш}$  охоплення полум'ям одного штабелю скористаємося залежністю для визначення площі пожежі за перші 10 мін з моменту його виникнення. В цьому випадку маємо

$$\tau_{ш} = 2 \sqrt{\frac{S_{Пш}}{\alpha V_{Пв}^2}}, \quad (3.14)$$

де  $S_{Пш}$  - площа штабелю, яка охоплюється полум'ям пожежі, м<sup>2</sup>;

$$S_{Пш} = bl + 2h((b+l)); \quad (3.15)$$

$\alpha$  - коефіцієнт, який враховує форму пожежі : кругова форма 360°  $\alpha = 3,14$  рад; кутова 180°  $\alpha = 1,57$  рад; кутова 90°  $\alpha = 0,785$  рад.

Згідно з даними роботи [105], для поширення пожежі між штабелями від теплового випромінювання полум'я одного штабелю необхідно визначити густину потоку  $q_p$  результуючого випромінювання від штабелю, який горить. В цьому випадку скористуємося залежністю (3.5).

Температуру факела  $T_\phi$  (К) штабелю, що горить, визначаємо з використанням залежності [52]

$$T_\phi = \frac{Q_{\min} \psi_n \tau_{ш}}{c_p G}, \quad (3.16)$$

де  $Q_{\min}$  - значення найнижчої робочої теплоти згорання горючого навантаження, кДж/кг;  $\psi_n$  - питома швидкість вигорання, кг/м<sup>2</sup>с;  $c_p$  - питома теплоємність штабелю, для якого розглядається пожежа, кДж/кг·К;  $G$  - пожежне навантаження складає 0,3 маси одного шару штабелю на відкриті для полум'я поверхні штабелю, кг/м<sup>2</sup>

$$G = 0,075\pi d\gamma_\delta; \quad (3.17)$$

$d$  - діаметр круглого лісоматеріалу, м;  $\gamma_\delta$  - густина круглого лісоматеріалу, кг/м<sup>3</sup> (густина при вологості 12% : сосна -  $\gamma_\delta = 520$  кг/м<sup>3</sup>; ялина -  $\gamma_\delta = 450$  кг/м<sup>3</sup>; дуб -  $\gamma_\delta = 810$  кг/м<sup>3</sup>).

Після цього визначаємо висоту  $H$  (м) осі конвективної колонки над штабелем з використанням залежності [134]

$$H = 1,32 \sqrt[3]{x^2 \left( \frac{1,4 Q_{\min} \psi_n b l}{T_0 V_e^3} \right)^5}, \quad (3.18)$$

де  $x$  - горизонтальна координата осі конвективної колонки, м (максимальне значення для одного штабелю  $x = 0,5l$ );  $T_0$  - температура довкілля, К.

Кут нахилу  $\alpha_k$  конвективної колонки відносно вертикальної осі

$$\alpha_k = \arctg(H / x). \quad (3.19)$$

Визначаємо значення підйомної сили  $F$  конвективної колонки. Відповідно до закону Ньютона-Рихмана кількість тепла  $q$ , яке віддається одиницею поверхні тіла в одиницю часу, пропорційна різниці температур поверхні тіла, наприклад,  $T_\phi$  і навколишнього середовища  $T_0$ . В цьому випадку густину теплового потоку можна визначити з використанням залежності

$$q = \alpha(T_\phi - T_0), \quad (3.20)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі при горінні штабелю від його верхньої площини, Вт/м<sup>2</sup> ( $\alpha = 5$  Вт/м<sup>2</sup> [82]).

Підйомна сила  $F$  (Н) конвективної колонки буде

$$F = \frac{1,02qbl\tau_q}{H}, \quad (3.21)$$

де  $\tau_q$  - час підйому теплового потоку від верхньої площини штабеля на висоту  $H$ , с ( $\tau_q = 1 \dots 2$  с).

Враховуючи, що маса  $m$  одного головня, який горить, помножена на прискорення вільного падіння  $g$  є силою тяжіння головешка  $F_2$  (маса одного головня в середньому не перевищує 0,03 кг, а сила тяжіння буде  $F_2 = 0,03 \cdot 9,81 = 0,294$  Н) і ця сила набагато менше підйомної сили конвективної колонки ( $F \gg F_2$ ). В цьому випадку палаючі головешки піднімуться на висоту  $h + H$ , а потік вітру віднесе їх на відстань  $L$  (м)

$$L = V_{\epsilon} \sqrt{\frac{2(h+H)}{g}}. \quad (3.22)$$

У випадку, коли  $L > b_{non}$  або  $b_{nov}$  палаючі головешки потрапляють на поверхні сусідніх штабелів, а це призводить до виникнення на них полум'я.

Наступним етапом необхідно визначити площі випромінювання від штабеля, який горить до штабеля, який знаходиться рядом. За площу випромінювання приймаємо площі бічних поверхонь палаючого штабеля і площу поверхні, яка утворюється проекцією висоти конвективної колонки на продовження площин бічних поверхонь штабеля. У цьому випадку маємо:

площа випромінювання  $S_{\epsilon.non}$  (м<sup>2</sup>) для поперечних розривів

$$S_{\epsilon.non} = b(h+H); \quad (3.23)$$

площа випромінювання  $S_{\epsilon.nov}$  (м<sup>2</sup>) для повздовжніх розривів

$$S_{\epsilon.nov} = l(h+H). \quad (3.24)$$

Для спрощення позначень надалі площі випромінювання теплових потоків будемо позначати  $S_{\epsilon}$ .

Визначаємо тепловий потік  $Q$  (Вт) випромінювання

$$Q = q_p S_{\epsilon}. \quad (3.25)$$

Визначаємо значення температури  $T_u$  (К) на бічній поверхні сусіднього штабеля, який знаходиться поруч зі штабелем, який горить

$$T_u = \frac{Q}{\alpha_u S_u} + T_0, \quad (3.26)$$

де  $\alpha_{ш}$  - коефіцієнт тепловіддачі бічної площини штабеля, кВт/(м<sup>2</sup>К);  $S_{ш}$  - площа бічної поверхні штабеля в поперечних або поздовжніх розривах між штабелями, м<sup>2</sup>.

Усереднене значення коефіцієнта тепловіддачі [135]

$$\alpha_{ш} = 0,0159 \left( \frac{blh\gamma_{\partial}K_{\rho}}{S_{\partial}} \right)^{0,222}, \quad (3.27)$$

де  $K_{\rho}$  – густина укладки круглого лісоматеріалу в штабелі;

$$K_{\rho} = \frac{V_{\partial}}{V_{ш}}; \quad (3.28)$$

$V_{\partial}$  – об'єм круглого лісоматеріалу в штабелі, м<sup>3</sup>;  $V_{ш}$  - об'єм штабеля пиломатеріалів ( $b \cdot l \cdot h$ ), м<sup>3</sup>; при розрахунках приймають середнє значення  $K_{\rho} = 0,785$ .

Після визначення  $T_{ш}$ , його значення порівнюють з температурою займання деревини  $T_{\partial}$ . У разі, коли  $T_{ш} \geq T_{\partial}$  для сусіднього штабеля, то відбувається займання цього штабеля, але при цьому згідно з даними роботи [50] необхідно враховувати час затримки займання коефіцієнтом  $k = 0,4 \dots 0,6$ . Отже, загоряння сусіднього штабеля в цьому випадку відбудеться за час  $\tau_3$

$$\tau_3 = \frac{\tau_{ш}}{k} - \tau_{ш}. \quad (3.29)$$

Тоді час загоряння штабелів  $\tau_i$ , які розташовані поруч з палаючим, за умови, що за час  $\tau_{ш}$  буде виконуватися умова  $T_{ш} \geq T_{\partial}$ , можна визначити з використанням залежності

$$\tau_i = \tau_{ш} + \tau_3 = \frac{\tau_{ш}}{k}, \quad (3.30)$$



Поставлену проблему будемо вирішувати в два етапи: 1) визначення швидкості поширення фронту пожежі  $V_{\phi}$  на відкритих складах круглих лісоматеріалів на основі побудови графової моделі; 2) визначення впливу швидкості і напрямку вітру  $V_{\epsilon}$  на швидкість поширення фронту пожежі  $V_{\phi}$  на відкритих складах круглих лісоматеріалів.

Розглянемо рішення цих етапів на прикладі.

**Приклад.** Визначити швидкість поширення фронту пожежі  $V_{\phi}$  на складі круглих лісоматеріалів, розміри якого зображені на рис. 3.2. В штабелях зберігається круглий лісоматеріал сосни густиною  $\gamma_{\delta} = 520 \text{ кг/м}^3$ , вологістю 11...12% і з температурою займання  $T_{\delta} = 528 \text{ К}$ . Пожежа виникла на штабелі **1.3** першого поперечного ряду. Розглянути  $V_{\phi}$  при  $V_{\epsilon} = 0$  на всю площу кварталу, а також  $V_{\phi}$  при  $V_{\epsilon} = 10 \text{ м/с}$ , враховуючи  $\alpha_{\epsilon} = 45^{\circ}, 90^{\circ}$  и  $270^{\circ}$  в процесі вільного горіння до початку локалізації пожежі в межах 25 хв. Згідно даних [55]  $Q_{\min} = 13800 \text{ кДж/кг}$ ;  $\psi_n = 0,0145 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ;  $c_p = 1,7 \text{ кДж/кгК}$ . Температура довкілля  $T_0 = 293 \text{ К}$ . Швидкість поширення полум'я по штабелю  $V_{\Pi} = 0,0585 \text{ м/с}$  при швидкості вітру  $V_{\epsilon} = 0$  і вологості деревини 11...12%.

**Рішення.**

**Визначення швидкості поширення фронту пожежі  $V_{\phi}$  на відкритих складах круглих лісоматеріалів на основі побудови графової моделі.**

1. Визначаємо площу штабеля, яка охоплюється полум'ям пожежі, з використанням залежності (3.15)

$$S_{\Pi u} = 6 \cdot 6,5 + 2 \cdot 6(6 + 6,5) = 189 \text{ м}^2.$$

2. Визначаємо  $\tau_{u}$  згідно залежності (3.14)

$$\tau_{u} = 2 \sqrt{\frac{189}{3,14 \cdot 0,0585^2}} = 265 \text{ с.}$$

3. Визначаємо температуру факела згідно залежностей (3.16) і (3.17)

$$T_{\phi} = \frac{13800 \cdot 0,0145 \cdot 265}{1,7 \cdot 0,075 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \cdot 520} = 1273 \text{ К.}$$

4. Визначаємо висоту осі і кут конвективної колонки по центру штабеля ( $x = 3,25 \text{ м}$ ) при  $V_{\phi} = 0$ . У цьому випадку в емпіричну залежність необхідно замість значення  $V_{\phi}$  підставити цифру 4 [133, 134]

$$H = 1,32 \sqrt[3]{3,25^2 \left( \frac{1,4 \cdot 13800 \cdot 0,0145 \cdot 6 \cdot 6,5}{293 \cdot 4^3} \right)^5} = 1,18 \text{ м;}$$

$$\alpha_k = \text{arctg}(1,18/3,25) = 20^{\circ}.$$

5. Визначаємо площу випромінювання для поперечних і поздовжніх розривів згідно залежностей (3.23) і (3.24)

$$S_{\phi.\text{non}} = 6(6+1,18) = 43,08 \text{ м}^2; \quad S_{\phi.\text{нов}} = 6,5(6+1,18) = 46,67 \text{ м}^2.$$

6. Визначаємо густину потоку  $q_{p.\text{нов}}$  результуючого випромінювання уздовж поздовжнього ряду від торця палаючого до торця сусіднього штабеля, який знаходиться на відстані  $x = 6 \text{ м}$ , відповідно залежності (3.5)

$$q_{p.\text{нов}} = \frac{5,7 \cdot 10^{-8} (1273^4 - 528^4)}{\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,6} - 1 + \frac{3 \cdot 0,45}{6} \cdot \frac{6}{4}} = 68517 \text{ Вт/м}^2.$$

Аналогічно визначаємо густину потоку  $q_{p.\text{non}}$  вдовж поперечного ряду при  $x = 16 \text{ м}$ . В цьому випадку  $q_{p.\text{non}} = 54200 \text{ Вт/м}^2$ .

7. Визначаємо тепловий потік випромінювання уздовж поздовжніх і поперечних рядів штабелів відповідно до залежності (3.25)

$$Q_{\text{нов}} = 10^{-3} \cdot 68517 \cdot 43,08 = 2952 \text{ кВт}; \quad Q_{\text{non}} = 10^{-3} \cdot 54200 \cdot 46,67 = 2529 \text{ кВт}$$

8. Визначаємо середнє значення коефіцієнта тепловіддачі відповідно до залежності (3.27)

$$\alpha_{u.нов} = 0,0159 \left( \frac{6 \cdot 6,5 \cdot 6 \cdot 520 \cdot 0,785}{43,08} \right)^{0,222} = 0,088 \text{ кВт/м}^2\text{К};$$

$$\alpha_{u.нон} = 0,0159 \left( \frac{6 \cdot 6,5 \cdot 6 \cdot 520 \cdot 0,785}{46,67} \right)^{0,222} = 0,086 \text{ кВт/м}^2\text{К}.$$

9. Визначаємо температуру на бічних поверхнях сусідніх штабелів уздовж поздовжніх  $T_{u.нов}$  і поперечних  $T_{u.нон}$  рядів відповідно до залежності (3.26)

$$T_{u.нов} = \frac{2952}{0,088 \cdot 6 \cdot 6} + 293 = 1225 \text{ К}; \quad T_{u.нон} = \frac{2529}{0,086 \cdot 6,5 \cdot 6} + 293 = 1047 \text{ К}.$$

10. Визначити час поширення пожежі на сусідні штабелі від штабеля № 1.3 в першому поперечному ряду, на якому виникла пожежа, і на поздовжній ряд. Час охоплення полум'ям штабеля № 1.3 складає 265 с або 4,42 хв. Після цього часу теплове випромінювання діє на штабелі № 1.2 і № 1.4 першого ряду і на штабель № 2.3 другого ряду. Температура, що діє на бічні поверхні штабелів № 1.2 і № 1.4 першого ряду дорівнює  $T_{u.нон} = 1047 \text{ К}$ , а на штабель № 2.3 другого ряду -  $T_{u.нов} = 1225 \text{ К}$ , що значно перевищує температуру займання деревини штабеля, яка дорівнює  $T_0 = 528 \text{ К}$ . Однак, загоряння сусідніх штабелів від штабеля № 1.3 відбуватиметься з деякою затримкою. При  $k = 0,6$  займання групи штабелів № 1.2, № 1.4 і № 2.3 відбудеться за час  $\tau_i = 4,42/0,6 = 7,37 \text{ хв}$ .

На підставі розрахованих даних можна стверджувати, що за час  $\tau_i = 7,37 \text{ хв}$  на складі лісоматеріалів буде горіти тільки один штабель № 1.3 з площею пожежі  $S_{П1} = 39 \text{ м}^2$  і почнуть займатися штабелі № 1.2, № 1.4 і № 2.3. За час  $7,37 \cdot 2 = 14,74 \text{ хв}$  площа пожежі збільшиться на площу трьох штабелів № 1.2, № 1.4 і № 2.3, тобто  $S_{П2} = 156 \text{ м}^2$ . Більш наочно процес поширення пожежі по складу лісоматеріалів розглянемо з використанням графової моделі (рис. 3.5)

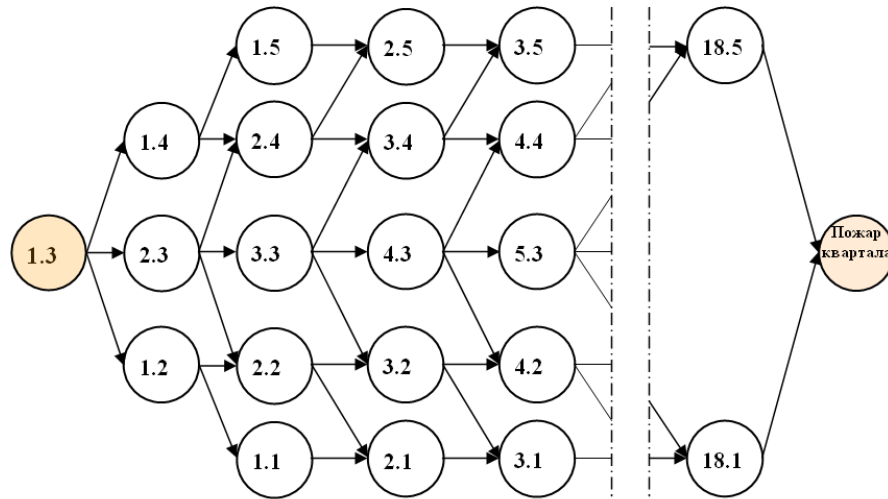


Рис. 3.5 – Каскадний граф поширення пожежі на складі круглих лісоматеріалів при  $V_e = 0$

Вершини графа (рис. 3.5) зображують штабелі лісоматеріалів, а ребра - час  $\tau_i$  охоплення полум'ям групи одночасно спалахнувших штабелів і переходу пожежі на сусідні штабелі, Цей час в нашому прикладі дорівнює  $\tau_i = 7,37$  хв. Результати аналізу каскадного графа показують, що на ньому можна виділити  $k_{uu} = 20$  груп штабелів, кожна з яких одночасно поширює пожежу уздовж кварталу складу. Використовуючи результати аналізу каскадного графа, можна визначити швидкість поширення фронту пожежі  $V_\phi$  (м/хв) для лісоскладу в залежності від місця його виникнення (на торці кварталу або уздовж його бокової сторони, а також безпосередньо на території складу поблизу цих сторін):

- в поздовжньому напрямку

$$V_{\phi, \text{нов}} = \frac{S_{uu} n_{uu}}{b n_{uu, \text{нов}} \tau_i}; \quad (3.31)$$

- в поперечному напрямку

$$V_{\phi, \text{нов}} = \frac{S_{uu} n_{uu}}{l \cdot n_{uu, \text{нов}} \tau_i}, \quad (3.32)$$

де  $S_{uu}$  – площа штабеля в плані,  $\text{м}^2$ ;  $n_{uu}$  – загальна кількість штабелів, які охоплені полум'ям пожежі, шт.;  $\tau_i$  – час горіння однієї групи штабелів, хв;

$n_{ш.нов}$ ,  $n_{ш.нов}$  – загальна кількість штабелів відповідно поперечних або поздовжніх рядів, які охоплені полум'ям пожежі, шт.

На підставі розгляду каскадного графа поширення пожежі на кварталі складу лісоматеріалів (рис. 3.5) і з використанням залежності (3.31) були виконані розрахунки швидкості поширення фронту пожежі в поздовжньому напрямку для прикладу, який розглядається, тобто при виникненні пожежі в першому поперечному ряду кварталу на штабелі № 1.3.

Розглядаючи швидкість поширення фронту пожежі в процесі вільного горіння штабелів на відкритому складі круглих лісоматеріалів можна помітити, що з моменту виникнення пожежі її фронт переміщується на край кварталу. Це можна пояснити тим, що після займання одного штабеля полум'я переходить одночасно на три штабеля (рис. 3.5) і далі на п'ять штабелів. При цьому швидкість фронту пожежі вздовж кварталу зменшується. Після досягнення пожежею ширини кварталу швидкість фронту досягає максимального значення. Після цього швидкість фронту пожежі стабілізується і досягає  $V_{ф.нов} = 1$  м/хв. При подальшому вільному горінні штабелів їх кількість, яка охоплена полум'ям в поздовжніх рядах, зменшується і швидкість фронту пожежі зменшується до  $V_{ф.нов} = 0,9$  м/хв.

***Визначення впливу швидкості і напрямку вітру  $V_e$  на швидкість поширення фронту пожежі  $V_{ф}$  на відкритих складах круглих лісоматеріалів.***

Для визначення впливу швидкості вітру  $V_e$  на швидкість поширення фронту пожежі  $V_{ф}$  на відкритих складах круглих лісоматеріалів скористаємося залежностями (3.11), (3.14), (3.16), (3.18), (3.20) - (3.22), (3.26), (3.31) і значенням часу  $\tau_i$ . Розглянемо згідно з умовою прикладу вплив  $V_e = 10$  м/с на  $V_{ф}$ , враховуючи  $\alpha_e = 45^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  і  $270^\circ\text{C}$  в процесі вільного горіння в межах 25 мін до початку локалізації пожежі.

1. Визначаємо швидкість поширення полум'я по штабелю  $V_{Пe}$  з урахуванням швидкості вітру і кута його дії на штабель

$$K_e = 0,9912 \exp(0,0388 \cdot 10) = 1,46; K_{\alpha=45} = -5 \cdot 10^{-5} \cdot 45^2 + 0,0123 \cdot 45 + 0,374 = 0,83;$$

$K_{\alpha=90} = 1,08$ ;  $K_{\alpha=270} = 0,05$ ;  $V_{II61} = 0,0585 \cdot 1,46 \cdot 0,83 = 0,071 \text{ м/с}$ ;  $V_{II62} = 0,092 \text{ м/с}$ ;  
 $V_{II63} = 0,0043 \text{ м/с}$ .

2. Визначаємо  $\tau_{ш}$  згідно залежності (3.14)

$$\tau_{ш1} = 2 \sqrt{\frac{189}{3,14 \cdot 0,071^2}} = 219 \text{ с}; \tau_{ш2} = 169 \text{ с}; \tau_{ш3} = 1804 \text{ с}.$$

3. Температура факела  $T_{\phi1} = 1062 \text{ К}$ ;  $T_{\phi2} = 811 \text{ К}$ ;  $T_{\phi3} = 1273 \text{ К}$ .

4. Висота осі конвективної колонки над штабелем при  $V_e = 10 \text{ м/с}$  буде  $H = 0,02 \text{ м}$ , а головешки потоком вітру понесе на відстань  $L = 11 \text{ м}$ , тобто на сусідні штабелі подовжніх або поперечних рядів залежно від напрямку вітру.

5. При певних значеннях  $\tau_{ш}$  охоплення полум'ям одного штабелю температура  $T_{ш}$  на бічних поверхнях сусідніх штабелів буде:

$T_{ш.нов1} = 729 \text{ К}$ ;  $T_{ш.нов1} = 646 \text{ К}$ ;  $T_{ш.нов2} = 423 \text{ К}$ ;  $T_{ш.нов2} = 397 \text{ К}$ ;  $T_{ш.нов3} = 1225 \text{ К}$ ;  
 $T_{ш.нов3} = 1047 \text{ К}$ .

Аналізуючи отримані значення температур можна зробити висновок про те, що займання сусідніх штабелів у разі дії на склад лісоматеріалів попутного вітру за час  $\tau_{ш2} = 169 \text{ с}$  не станеться. В цьому випадку буде затримка в займанні сусідніх штабелів до  $\tau_{ш2} = 210 \text{ с}$ , тобто тільки за цей час температура факела досягне  $T_{\phi2} = 1008 \text{ К}$ , а  $T_{ш.нов2} = 692 \text{ К}$ ;  $T_{ш.нов2} = 613 \text{ К}$ .

Результати виконаної роботи дали можливість встановити вплив швидкості і напрямку вітру на швидкість поширення фронту пожежі. Наприклад, при  $V_e = 10 \text{ м/с}$  час загоряння штабелів розташованих поряд з тим, що горить за умови, що за час  $\tau_{ш}$  виконуватиметься умова  $T_{ш} \geq T_d$ , буде: 1) при бічному вітрі  $\alpha_e = 45^\circ \rightarrow \tau_{i1} = 6,08 \text{ хв}$ ; 2) при попутному вітрі  $\alpha_e = 90^\circ \rightarrow \tau_{i2} = 5,83 \text{ хв}$ ; 3) при зустрічному вітрі  $\alpha_e = 270^\circ \rightarrow \tau_{i3} = 30,07 \text{ хв}$ .

В цьому випадку зміна швидкості фронту пожежі на складі круглого лісоматеріалу при  $V_e = 10 \text{ м/с}$  в порівнянні з безвітряною погодою буде: 1) при бічному вітрі  $\alpha_e = 45^\circ \rightarrow V_{\phi}$  збільшується на 21,4%; 2) при попутному вітрі  $\alpha_e = 90^\circ \rightarrow V_{\phi}$  збільшується на 26,6%; 3) при зустрічному вітрі  $\alpha_e = 270^\circ \rightarrow V_{\phi}$  зменшується, приблизно, в 3,5 рази.

Виходячи з вище викладеного можна стверджувати, що за відсутності вітру до початку локалізації пожежі після 25 мін вільного горіння полум'ям буде охоплено 11 штабелів загальною площею 429 м<sup>2</sup>. За умови наявності вітряної погоди при  $V_g = 10$  м/с за час вільного горіння полум'ям буде охоплено: 1) при бічному вітрі  $\alpha_g = 45^\circ \rightarrow 15$  штабелів загальною площею 585 м<sup>2</sup>; 2) при попутному вітрі  $\alpha_g = 90^\circ \rightarrow 17$  штабелів загальною площею 663 м<sup>2</sup>; 3) при зустрічному вітрі  $\alpha_g = 270^\circ \rightarrow 3$  штабелі загальною площею 117 м<sup>2</sup>.

Результати виконаних досліджень дозволили зробити такі висновки:

- Розроблена методологія прогнозування розвитку пожежі і швидкості поширення його фронту на відкритих складах круглих лісоматеріалів з використанням графової моделі, яка дозволяє виділяти групи штабелів охоплених полум'ям і уточнювати порядок їх займання від теплового випромінювання штабелів, що горять, а також визначати час поширення і площу пожежі по кварталу складу.
- Найменша швидкість поширення фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів спостерігається у разі безвітряної погоди і за наявності зустрічного вітру фронту пожежі.
- Збільшення швидкості фронту пожежі за наявності вітру посилюється за рахунок розкидання тих, що горять головешок на значні відстані. Наприклад, при швидкості вітру 10 м/с дальність розкидання головешкою досягає 11 м, а швидкість фронту пожежі зростає при бічному і попутному вітрі на 21,4...26,6%.

#### **3.4. Вплив небезпечних чинників пожежі на відкритих складах деревообробних підприємств на екологію навколишнього середовища**

Відомо, що екологічна безпека - стан захищеності довкілля і життєво важливих інтересів людини і громадянина від можливої негативної дії господарської і іншої діяльності і погроз виникнення надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру та їх наслідків. У поняття екологічної

безпеки входить система регулювання і управління, що дозволяє прогнозувати, не допускати, а у разі виникнення, ліквідувати розвиток надзвичайних ситуацій. Екологічна безпека реалізується на глобальному, регіональному і локальному рівнях. Локальний рівень включає міста, райони, підприємства металургії, хімічної, нафтопереробної, гірничодобувної промисловостей та інших. Для локального рівня розроблено дуже багато заходів і технологій, які дозволяють на певному рівні забезпечувати екологічну безпеку. В цьому напрямку виконано багато робіт, результати яких на сучасному етапі до деякої міри дозволяють підвищувати ефективність захисту від забруднення навколишнє середовище. Цими роботами займалися відомі вчені: А.Л. Большеротов [26-29], В.І. Коробкін [145], Л.В. Передельский, Є.О. Лобанова, І.І. Мазур, О.І. Молдаванов, М.Г.Рибальский [208], Т.А. Хоружая, А.Г. Шмаль [245, 246] та багато інших. Дослідженнями проблеми екологічних ризиків займалися такі вчені, як В.І. Андрейцев [8], Г.І. Балюк, Н.О. Корнякова [143, 144], Л. Решітник, Т.О. Третьак, М. Фролов, Т.М. Чебан [239], А.В. Яблоков та інші. Але розроблені ними методи стосуються лише теоретичних підходів до цієї проблеми, а також питанням очищення води від токсичних речовин, питанням боротьби зі знищенням регіональних і локальних зелених насаджень тощо. Дуже мало робіт присвячено забрудненню навколишнього середовища токсичними викидами від пожеж. Особливо це стосується пожеж на складах лісоматеріалів, де в цій локальній зоні температура середовища перевищує 70°C, густина кисню може стати меншою ніж 0,226 кг/м<sup>3</sup>, а також може в цій зоні збільшитися більше норми густина оксиду вуглецю CO > 0,00116 кг/м<sup>3</sup>, вуглекислого газу CO<sub>2</sub> > 0,11 кг/м<sup>3</sup>, хлористого водню HCl > 23·10<sup>-6</sup> кг/м<sup>3</sup> та інших токсичних речовин, які можуть загрожувати життю людини. Крім цього, в процесі пожежі утворюється дим, оптична густина якого може бути більша допустимого значення (допустима оптична густина диму  $\mu \leq 1,2$  Нп/м, що забезпечує видимість до 2 м, тобто в межах росту людини, яка при переміщенні повинна бачити підлогу). Такі обставини призводять до



перевищення граничнодопустимого екологічного ризику і відповідно до забруднення навколишнього середовища.

Підтвердженням цього є дані статистики по кількості пожеж на Україні, в тому числі і на складах лісоматеріалів. Ці дані вказують на те, що кількість пожеж з кожним роком зростає. Наприклад, в 2012 році у порівнянні з 2011 роком їх кількість зросла на 17,5%, а прямі збитки з 828958 тис. грн зросли до 856701 тис. грн [102, 100, 101]. При цьому відсутні дані по забрудненню навколишнього середовища токсичними речовинами, які призводять до порушення екологічної безпеки.

Тому виникає проблема у невизначеності зв'язку між пожежним і екологічним ризиками, а розв'язок цієї проблеми дозволить з певною імовірністю прогнозувати екологічну безпеку на локальному рівні та попереджати загрозу, яка може виникнути при її аудиту, наприклад, на відкритих складах лісоматеріалів.

Останнім часом при розгляді процесу розповсюдження пожежі по території складу пиломатеріалів використовують математичні моделі, які враховують теплове випромінювання, від якого нагрівається поверхня деревини сусіднього штабеля від факелу полум'я штабеля, що горить. Крім цього, необхідно враховувати перекидання вітром іскор і головешок, що горять, на деревину сусіднього штабеля, які також сприяють поширенню пожежі та обов'язково враховувати вплив вітру на положення факела в просторі [105].

Але в усіх цих дослідженнях зовсім не розглядають питання екологічної безпеки і не пов'язують пожежний ризик з екологічним ризиком. Крім цього, не розглядають нормативні дані екологічного ризику. Тому розгляд цих питань є актуальною задачею сьогодення.

Для розв'язання цієї задачі необхідно на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розробити метод встановлення залежності екологічного ризику від пожежного на відкритих складах

лісоматеріалів та його зменшення за рахунок впровадження оптимальних проектів системи пожежогасіння.

Екологічний ризик техногенного характеру на об'єкті залежить в першу чергу безпосередньо від ризику виникнення надзвичайної ситуації. Наприклад, на об'єкті існує ризик виникнення пожежі, яка відповідно призведе до виникнення локального екологічного забруднення в об'ємі, який до деякої міри буде пропорційний площі виникнення пожежі.

Розглянемо згідно рекомендацій [220] конструктивні особливості складу лісоматеріалів. Площа складу лісоматеріалу відкритого зберігання повинна бути не більше 4,5 га і повинна поділятися на квартали. Ширина кварталу не повинна перевищувати 100 м. Групи штабелів необхідно відокремлювати між собою повздовжніми та поперечними розривами. Ширина повздовжніх розривів  $b_{нов}$  повинна бути не менше  $1,5h$  (де  $h$  - висота штабелю), а поперечних - не менше  $b_{нон} = h$ . По повздовжнім розривам передбачають тверде покриття шириною не менше 3 м для проїзду пожежних машин. Відстань від штабелів лісоматеріалів до середини вказаних доріг необхідно приймати з урахуванням розсипання штабелів при пожежі, але не менше 8 м.

Для прикладу розглянемо основні параметри одного кварталу відкритого складу лісоматеріалів (рис. 3.1): штабелі розміром  $b \times l \times h = 6 \times 6 \times 5$  м; ширина повздовжніх розривів між штабелями  $b_{нов} = 8 \cdot 2 = 16$  м; ширина поперечних розривів між штабелями  $b_{нон} = 5$  м; загальна кількість повздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною 193 м; загальна площа кварталу  $18142 \text{ м}^2 \approx 1,8$  га, на якій розміщено 90 штабелів; протипожежні розриви між кварталами при висоті штабелів 5 м дорівнюють 30 м.

На території відкритих складів лісоматеріалів слід передбачати адресну електричну пожежну сигналізацію з ручними пожежними сповіщувачами. Пожежні сповіщувачі слід встановлювати по протипожежних розривах між окремими групами штабелів на негорючих опорах і на висоті 1,35 м від землі.

Сповіщення людей про пожежу слід виконувати на території відкритих складів по гучномовному розпорядливо-пошуковому диспетчерському зв'язку та звуковій сигналізації (сирени, дзвони тощо). За наявності установок диспетчерського телевізійного спостереження за технологічним процесом на складі лісоматеріалів їх слід використовувати і для спостереження за протипожежним режимом на території.

На відкритих складах лісоматеріалів сумарною місткістю до 10 000 щільних м<sup>3</sup> повинні бути протипожежний водопровід низького тиску та насосні станції протипожежного водопроводу. Насосні станції слід розміщувати на відстані не менше 40 м від штабелів. Насосні станції необхідно, як правило, передбачати з управлінням без обслуговуючого персоналу: автоматичним або дистанційним з приміщення чергового персоналу.

Виходячи з наявності на відкритих складах лісоматеріалів елементів запобігання виникнення та попередження розповсюдження пожежі, пожежний ризик для складу лісоматеріалів  $\varepsilon_o$  можна визначити з використанням залежності

$$\varepsilon_o = \varepsilon_c \varepsilon_{z.c} \varepsilon_{m.c} \varepsilon_{e.m} \varepsilon_{n.c}, \quad (3.33)$$

де  $\varepsilon_c$  – ризик відмови пожежного сповіщувача;  $\varepsilon_{z.c}$  – ризик відмови звукової сигналізації;  $\varepsilon_{m.c}$  – ризик відмови телевізійної системи спостереження;  $\varepsilon_{e.m}$  – ризик відмови електричної мережі;  $\varepsilon_{n.c}$  – ризик відмови насосної станції.

При визначенні ризиків відмов окремих елементів будемо враховувати час їх безперервної роботи (напрацювання) протягом *половини* значення параметра масштабу  $a = T_B$ . Крім цього, густину розподілу напрацювання  $\tau$  за результатами досліджень приймаємо так, а саме для:

- пожежних сповіщувачів розподіл відповідає експоненціальному при  $b = 1$ ;

- звукової сигналізації розподіл відповідає експоненціальному при  $b = 1$ ;

- телевізійної системи спостереження розподіл відповідає розподілу Вейбулла при  $b = 2$ ;
- електричної мережі розподіл відповідає розподілу Вейбулла при  $b = 2$ ;
- насосної станції розподіл відповідає нормальному розподілу при  $b = 2,5$  і  $S_\tau = 2920$  год.

Після визначення та врахування густин розподілу, визначаємо значення ризиків відмов.

Для сповіщувачів, згідно з ДСТУ EN 54,  $a_c = T_{B.c} = 10 \cdot 365 \cdot 24 = 87600$  год,  $\lambda_c = 1/T_{B.c} = 1/87600 = 1,14 \cdot 10^{-5}$  відмов/год;  $\tau_c = 43800$  год. Тоді отримаємо

$$\varepsilon_c = 1 - \exp(-\lambda_c \tau_c) = 1 - \exp(-1,14 \cdot 10^{-5} \cdot 43800) = 0,39.$$

Ризик відмови звукової сигналізації визначаємо аналогічно. При цьому, згідно із рекомендаціями, які базуються на дворічному терміні гарантії на радіоелектронну апаратуру, визначаємо  $a_{z.c} = T_{B.z.c} = 2 \cdot 365 \cdot 24 = 17520$  год,  $\lambda_{z.c} = 1/T_{B.z.c} = 1/17520 = 5,7 \cdot 10^{-5}$  відмов/год;  $\tau_c = 8760$  год. В цьому випадку отримаємо

$$\varepsilon_{z.c} = 1 - \exp(-\lambda_{z.c} \tau_{z.c}) = 1 - \exp(-5,7 \cdot 10^{-5} \cdot 8760) = 0,39.$$

Аналогічно визначаємо ризик відмови телевізійної системи спостереження за залежністю

$$\varepsilon_{m.c} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau_{m.c}}{T_{B.m.c}}\right)^b\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{8760}{17520}\right)^2\right] = 0,2211.$$

Згідно з правилами влаштування електроустановок, час напрацювання електричної мережі на відмову складає 20 років. Тоді

$$a_{e.m} = T_{B.e.m} = 20 \cdot 365 \cdot 24 = 175200 \text{ год,}$$

а  $\tau_{e.m} = 87600$  год. В цьому випадку отримаємо

$$\varepsilon_{e.m} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau_{e.m}}{T_{B.e.m}}\right)^b\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{87600}{175200}\right)^2\right] = 0,2211.$$

Ризик відмови насосної станції, згідно з правилами влаштування насосних та електроустановок, визначаємо з урахуванням часу напрацювання на відмову  $a_{н.с} = T_{B.н.с} = 2 \cdot 365 \cdot 24 = 17520$  год, за час експлуатації один рік, тобто  $\tau_{н.с} = 8760$  год. Спочатку визначаємо квантиль нормального розподілу

$$u_p = \frac{\tau_{н.с} - T_{B.н.с}}{S_\tau} = \frac{8760 - 17520}{2920} = -3.$$

Функція Лапласа є непарною. Тому  $\Phi(-3) = -\Phi(3)$ .

Згідно із таблицями функцій Лапласа довідкової літератури отримуємо  $-\Phi(3) = -0,4986$ .

Тоді, отримуємо

$$\varepsilon_{н.с} = 0,5 + \Phi(u_p) = 0,5 + (-0,4986) = 0,0014.$$

В нашому випадку пожежний ризик для відкритого складу лісоматеріалів буде

$$\varepsilon_o = 0,39 \cdot 0,39 \cdot 0,2211 \cdot 0,2211 \cdot 0,0014 = 1,04 \cdot 10^{-5}.$$

Отримане значення пожежного ризику відповідає значенню прийнятного ризику, тобто він знаходиться в межах  $10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ .

Тепер перейдемо до визначення при цих же умовах екологічного ризику у випадку пожежі на відкритому шахтному складі лісоматеріалів.

На *першому етапі* визначимо об'єм розповсюдження продуктів горіння, які виділяються з площі пожежі на відкритому шахтному складі лісоматеріалів. Для цього скористуємося відомими даними роботи [105]. Висота полум'я від основи штабеля при швидкості вітру  $V_e = 4$  м/с становить 6 м. Напрямок вектору швидкості вітру співпадає з напрямком повздовжніх рядів штабелів (найгірший варіант). Висота конвективної колонки з продуктами горіння за відомими даними для лісових пожеж у 20...30 разів більша за висоту полум'я. Швидкість розповсюдження фронту пожежі  $V_\phi$  по відкритому складу лісоматеріалів при швидкості вітру  $V_e = 4$  м/с знаходиться в межах: за початковий час  $\tau_1 = 10$  хв –  $V_{\phi 1} = 1,5$  м/хв; потім зростає до  $V_{\phi 2} = 3,3$  м/хв. Розглянемо випадок, коли пожежа переміщується вздовж повздовжніх рядів. Загальна довжина квартала відкритого шахтного складу лісоматеріалів дорівнює 193 м. За початковий час  $\tau_1 = 10$  хв пожежа розповсюдиться на довжину, яка дорівнює  $l_{\Pi 1} = V_{\phi 1} \cdot \tau_1 = 1,5 \cdot 10 = 15$  м. Залишок довжини квартала склада  $l_{\Pi 2} = 193 - 15 = 178$  м буде охоплений полум'ям за  $\tau_2 = 178/3,3 = 53,9$  хв, тобто весь квартал склада буде охоплений пожежею за час  $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 63,9$  хв. За цей час продукти горіння, які знаходяться в конвективних колонках, від швидкості вітру перемістяться на відстань  $V_e \cdot \tau = 4 \cdot 60 \cdot 63,9 = 15336$  м. Тоді загальна площа розповсюдження продуктів горіння складатиме  $S_{n.z} = 94 \cdot (193 + 15336) = 1459726 \text{ м}^2 \approx 146$  га. При середньому значенню висоти конвективної колонки  $H = 6 \cdot 25 = 150$  м об'єм розповсюдження продуктів горіння над кварталом склада, який охоплений пожежею, буде дорівнювати  $V_{n.z} = S_{n.z} \cdot H = 1459726 \cdot 150 = 218958900 \text{ м}^3$ .

Згідно із довідковою літературою для керівника гасіння пожежі відомо, що швидкість вигорання деревини в штабелі висотою до 8 м при густині укладки 0,2...0,3 і вологості 12...14% дорівнює  $V = 6,4 \text{ кг/м}^2 \text{ хв}$ . Тоді за час  $\tau = 63,9$  хв при площі пожежі  $S_{\Pi} = 94 \cdot 193 = 18142 \text{ м}^2$  в навколишнє середовище за допомогою конвективних колонок перейде продуктів горіння

$$m = S_{II} V \tau = 18142 \cdot 6,4 \cdot 63,9 = 7419353 \text{ кг.}$$

На підставі параметрів горючого навантаження, а саме враховуючи питомі значення  $L_i$  виділених токсичних продуктів від горіння деревини лісоскладу, визначаємо значення маси  $m_i$  кожного токсичного продукту, виділеного в об'єм  $V_{n.2}$  [135]:

- диоксиду вуглецю

$$m_{CO_2} = mL_{CO_2} = 7419353 \cdot 1,57 = 11648384 \text{ кг;}$$

- оксиду вуглецю

$$m_{CO} = mL_{CO} = 7419353 \cdot 0,024 = 178064 \text{ кг;}$$

- оксидів азоту

$$m_{NO_x} = mL_{NO_x} = 7419353 \cdot 0,003 = 22258 \text{ кг;}$$

- синильної кислоти

$$m_{HCN} = mL_{HCN} = 7419353 \cdot 0,00003 = 223 \text{ кг;}$$

- акролеїну

$$m_{AKP} = mL_{AKP} = 7419353 \cdot 0,004 = 29677 \text{ кг;}$$

- споживання кисню

$$m_{O_2} = mL_{O_2} = 7419353 \cdot (-1,15) = -8532255 \text{ кг.}$$

Визначаємо концентрацію токсичних продуктів в  $\text{г/м}^3$ , які знаходяться в об'ємі навколишнього середовища  $V_{n.2}$  за залежністю

$$K_i = \frac{10^3 m_i}{V_{n.2}}$$

та порівнюємо з допустимим значенням:

$$- K_{CO_2} = 53,2 \text{ г/м}^3 < [K_{CO_2}] = 110 \text{ г/м}^3;$$

$$- K_{CO} = 0,8 \text{ г/м}^3 < [K_{CO}] = 1,16 \text{ г/м}^3;$$

$$- K_{NO_x} = 0,1 \text{ г/м}^3 < [K_{NO_x}] = 0,2 \text{ г/м}^3;$$

$$- K_{HCN} = 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3 < [K_{HCN}] = 0,1 \text{ г/м}^3;$$

$$- K_{AKP} = 0,136 \text{ г/м}^3 > [K_{AKP}] = 0,1 \text{ г/м}^3;$$

зменшення густини кисню

$$- \rho_{O_2} = 270 - \frac{8532255 \cdot 10^3}{218958900} = 231 \text{ г/м}^3 > [\rho_{O_2}] = 226 \text{ г/м}^3;$$

оптична густина диму  $\mu$  [60]

$$\mu = \frac{c_p \rho_0 T_0 D}{Q_{\min} \eta (1 - \phi)} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\psi_n S_{II} \eta Q_{\min} (1 - \phi) \tau}{c_p \rho_0 T_0 V} \right) \right],$$

де  $c_p \approx 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  – ізобарна теплоємність газового середовища;  $\rho_0 \cdot T_0 \approx 3 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}$ ;  $\eta \approx 1$  – коефіцієнт повноти згоряння; значення  $\phi \approx 0,5$  – коефіцієнт тепловтрат;  $Q_{\min}$  – найнижча теплота згоряння, Дж/кг;  $\psi_n$  – питома швидкість вигорання, кг/м<sup>2</sup>с;  $D$  – димоутворююча здатність, Нп·м<sup>2</sup>/кг наведені в ГОСТ 12.1.004 – 91 (додаток 4);

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 57}{14000 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot (1 - 0,5)} \times \\ &\times \left[ 1 - \exp \left( - \frac{0,0145 \cdot 18142 \cdot 1 \cdot 14000 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,5)}{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 218958900} 63,9 \cdot 60 \right) \right] = \\ &= 0,25 \text{ Нп/м}; \end{aligned}$$

-  $\mu = 0,25 \text{ Нп/м} < [\mu] = 1,2 \text{ Нп/м}$ , що відповідає граничній видимості  $l_{ep} = 2,38/\mu = 2,38/0,25 = 9,52 \text{ м}$ .

Аналізуючи отримані результати, можна зауважити, що на загрозу екологічної безпеки при виникненні пожеж на відкритих складах лісоматеріалів в значній мірі впливає швидкість вітру та тривалість вільного



горіння, тобто час до початку гасіння пожежі пожежно-рятувальними підрозділами.

Наприклад, при зменшенні швидкості вітру в два рази, а саме з 4 м/с до 2 м/с, зменшується площа розповсюдження продуктів горіння. В нашому прикладі зі 146 га до 73,9 га. Відповідно зменшується об'єм розповсюдження продуктів горіння також приблизно в два рази, що призводить до збільшення концентрації токсичних продуктів в два рази. В цьому випадку на площі 73,9 га в районі, який належить відкритому складу лісоматеріалів, навколишнє середовище буде забруднене недопустимою концентрацією для життя людини оксидом вуглецю ( $K_{CO} = 1,6 \text{ г/м}^3$ ), акролеїном ( $K_{AKP} = 0,272 \text{ г/м}^3$ ) та зменшенням густини кисню до  $192 \text{ г/м}^3$ , що унеможливило перебування людини на цій території.

Крім цього, гранична видимість від задимлення зменшується до 4 м, що призводить до неможливості використовувати автомобільний транспорт для переміщення пожежно-рятувальним підрозділам.

З іншого боку, зменшення часу вільного горіння призводить до зменшення площі пожежі. При цьому зменшується перехід за допомогою конвективних колонок продуктів горіння в навколишнє середовище, тобто зменшується концентрація токсичних продуктів і димовиділення. Зменшення часу вільного горіння можливо при умові впровадження оптимальних заходів пожежогасіння, які дозволяють оперативно виконувати процес локалізації та гасіння пожежі.

Одним з таких напрямків є впровадження на відкритих складах лісоматеріалів *системи оперативного сповіщення про пожежу* до диспетчерської державної служби надзвичайних ситуацій. Така система сповіщення про пожежу дозволяє скоротити час прибуття до місця виклику пожежно-рятувальних підрозділів приблизно на 18...20%.

Крім цього, для початкової локалізації пожежі до приїзду пожежно-рятувальних підрозділів, по периметру складу доцільно встановлювати *автоматичну водяну дренчерну систему пожежогасіння*, яка буде

працювати на тих ділянках, де виникла пожежа, тобто на тих ділянках звідки був поданий сигнал від пожежного сповіщувача. Такий підхід ґрунтується на багаторічному аналізі статистичних даних, згідно яких встановлено, що більшість пожеж на відкритих складах виникає від впливу людського фактору (необережне поводження з вогнем). Також встановлено, що 96% пожеж починається на периметрі складу.

Наступним заходом по зменшенню ризику виникнення пожежі та зменшенню часу вільного горіння у випадку її виникнення є впровадження на відкритих складах лісоматеріалів **добровільних пожежних команд** із забезпеченням цих команд пожежним спорядженням (захисний одяг, пожежні рукава, ручні пожежні стволи тощо).

Виходячи з основних положень управління екологічною безпекою, за основу для визначення **екологічного ризику** можна прийняти експоненціальний розподіл, розподіл Вейбулла та нормальний розподіл.

**Визначення екологічного ризику  $\varepsilon_e$** , виходячи з основних положень екологічної безпеки, будемо визначати за залежністю

$$\varepsilon_e = \varepsilon_o P_{np.l} (1 - P_{ев.л}) (1 - R_{cn}(\tau)) (1 - R_{авт}(\tau)) \leq [\varepsilon_e], \quad (3.34)$$

де  $\varepsilon_o$  – пожежний ризик для відкритого шахтного складу лісоматеріалів, визначений за залежністю (3.33);  $P_{np.l}$  – імовірність присутності людей на складі лісоматеріалів;  $P_{ев.л}$  – імовірність успішної евакуації людей зі складу лісоматеріалів при виникненні пожежі;  $R_{cn}(\tau)$  – імовірність безвідмовної роботи системи оперативного сповіщення;  $R_{авт}(\tau)$  – імовірність безвідмовної роботи автоматичної системи пожежогасіння;  $[\varepsilon_e] = 10^{-7}$  – допустиме значення прийнятного екологічного ризику (якщо  $[\varepsilon_e] = 10^{-6}$ , то таке значення відповідає граничнодопустимому значенню екологічного ризику).

Розглянемо визначення невідомих складових залежності (3.34).

1. *Імовірність присутності людей  $P_{np.l}$  на складі лісоматеріалів*

$$P_{np.l} = \frac{\tau_{np.l}}{24},$$

де  $\tau_{np.l}$  – час *присутності людей* на робочих місцях, год; в більшості випадків для відкритих шахтних лісоскладів  $\tau_{np.l} = 8$  год.

2. *Імовірність успішної евакуації людей*  $P_{ев.л}$  зі складу лісоматеріалів

$$P_{ев.л} = \frac{0,8\tau_k - \tau_e}{\tau_{n.e}},$$

де  $\tau_k$  – критичний час пожежі, тобто це час, на протязі якого ще не виникає загроза від пожежі для навколишнього середовища та життєво важливим інтересам людини і громадянина, хв; для відкритих складів лісоматеріалів  $\tau_k = 5 \dots 10$  хв;  $\tau_e$  – час тривалості евакуації людей з території складу до стоку, хв

$$\tau_e = \frac{L_e}{kV_e};$$

$L_e$  – шлях евакуації до стоку, м;  $k$  – кількість евакуаційних шляхів;  $V_e = 66 \dots 90$  м/хв – середня швидкість вільного руху людського потоку, м/хв;  $\tau_{n.e} = 3 \dots 6$  хв – час від початку пожежі до початку евакуації, хв.

3. *Імовірність безвідмовної роботи системи оперативного сповіщення*  
 $R_{cn}(\tau)$

$$R_{cn} = \exp(-\lambda_{cn}\tau_{cn}),$$

де  $\lambda_{cn} = 5,7 \cdot 10^{-5}$  відмов/год – інтенсивність відмов радіоелектронної апаратури, відмов/год;  $\tau_{cn}$  – термін експлуатації радіоелектронної апаратури, год.

4. Імовірність безвідмовної роботи системи автоматичного пожежогасіння  $R_{авт}(\tau)$  визначаємо з використанням нормального закону розподілу за залежністю

$$R_{авт}(\tau) = 0,5 - \Phi(u_p).$$

Для визначення  $R_{авт}(\tau)$  необхідно розрахувати квантиль нормального розподілу з урахуванням кількості вмикань  $\tau$  системи за термін експлуатації, допустимої кількості вмикань системи до напрацювання на відмову  $T_{в.авт} = 5$  вмикань згідно з ГОСТ Р 53288-2009, середнього квадратичного відхилення напрацювання  $\tau S_\tau = 1,7$  вмикань та функції Лапласа.

**Розглянемо** для нашого прикладу **визначення екологічного ризику** за умови, що час присутності людей на робочих місцях відкритого складу лісоматеріалів  $\tau_{пр.л} = 8$  год, критичний час пожежі  $\tau_k = 7$  хв, кількість евакуаційних шляхів  $k = 2$ , час від початку пожежі до початку евакуації  $\tau_{н.е} = 4$  хв, шлях евакуації до стоку  $L_e = 400$  м з навітряної сторони, середня швидкість вільного руху людського потоку  $V_e = 70$  м/хв, кількість вмикань системи автоматичного пожежогасіння  $\tau = 1$ .

**Визначаємо екологічний ризик  $\varepsilon_e$**  для відкритого шахтного складу лісоматеріалів з використанням залежності (8).

1. Пожежний ризик  $\varepsilon_o = 1,04 \cdot 10^{-5}$ .
2. Імовірність присутності людей  $P_{пр.л}$  на складі лісоматеріалів

$$P_{пр.л} = \frac{8}{24} = 0,3333.$$

3. Імовірність успішної евакуації людей  $P_{ев.л}$  зі складу лісоматеріалів

$$\tau_e = \frac{400}{2 \cdot 70} = 2,86 \text{ хв};$$

$$P_{ев.л} = \frac{0,8 \cdot 7 - 2,86}{4} = 0,685.$$

4. Імовірність безвідмовної роботи системи оперативного сповіщення  $R_{cn}(\tau)$

$$R_{cn} = \exp(-5,7 \cdot 10^{-5} \cdot 8760) = 0,61.$$

5. Імовірність безвідмовної роботи системи автоматичного пожежогасіння  $R_{авт}(\tau)$ :

- квантиль нормального розподілу

$$u_p = \frac{1-5}{1,7} = -2,35;$$

- згідно із таблицями функцій Лапласа отримуємо  $-\Phi(2,35) = -0,4905$ ;

- тоді

$$R_{авт}(\tau) = 0,5 - (-0,4905) = 0,9905.$$

Визначаємо екологічний ризик за залежністю (8)

$$\begin{aligned} \varepsilon_e &= 1,04 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3333(1-0,685)(1-0,61)(1-0,9905) = \\ &= 0,4 \cdot 10^{-8} < [\varepsilon_e] = 10^{-7}. \end{aligned}$$

Результати розрахунків показали, що екологічна безпека від пожежі на відкритому складі лісоматеріалів забезпечена. Це підтверджується значенням екологічного ризику, який менше допустимого прийнятного значення. На забезпечення екологічної безпеки для нашого прикладу в першу чергу впливає впровадження оптимальних заходів системи пожежогасіння. Звідси випливає висновок, що екологічною безпекою можна керувати за рахунок практичної реалізації адміністративно-правових і економічних методів, а

саме необхідно додатково впровадити систему оперативного сповіщення про пожежу, автоматичну водяну систему пожежогасіння, а також організувати добровільну пожежну команду. Безумовно ці заходи потребують для впровадження додаткових капіталовкладень і коштів, але їх окупність очевидна.

Результати виконаної роботи стосовно екологічної безпеки дозволили зробити такі висновки:

- Встановлено, що екологічний ризик при імовірності виникнення пожежі на відкритих шахтних складах лісоматеріалів в першу чергу залежить від пожежного ризику. Зменшення пожежного ризику призводить до зменшення екологічного ризику.
- На екологічну безпеку в значній мірі впливає швидкість вітру. Зменшення швидкості вітру при пожежі на відкритих складах лісоматеріалів в два рази, а саме, наприклад, з 4 м/с до 2 м/с, зменшує площу розповсюдження продуктів горіння приблизно в два рази, і в багатьох випадках, навіть унеможлиблює перебування людини на цій території.
- Екологічною безпекою на відкритих складах лісоматеріалів можна керувати за рахунок практичної реалізації адміністративно-правових і економічних методів.

### **3.5. Висновки**

1. Розроблена з використанням графових моделей методологія визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах лісоматеріалів, яка дозволяє в залежності від виду лісоматеріалів і місця виникнення пожежі визначати швидкість розповсюдження фронту пожежі по кварталу складу та площу пожежі в залежності від тривалості вільного горіння.

2. Встановлено, що швидкість фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів при однакових умовах приблизно в 3...3,5 рази більша від швидкості фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів.

3. На швидкість фронту пожежі в значній мірі впливає швидкість і напрям дії вітру. Результати аналізу графових моделей показали, що при збільшенні швидкості вітру до 10 м/с у порівнянні з безвітряною погодою швидкість фронту пожежі: 1) при бічному вітрі  $\alpha_{\text{в}} = 45^\circ$  збільшується на 21,4%; 2) при попутному вітрі  $\alpha_{\text{в}} = 90^\circ$  збільшується на 26,6%; 3) при зустрічному вітрі  $\alpha_{\text{в}} = 270^\circ$  зменшується, приблизно, в 3,5 рази.

4. Встановлено, що тривалість вільного розповсюдження пожежі залежить від місця її виникнення на кварталі складу. Найбільша тривалість вільного розповсюдження пожежі має місце при її виникненні на зовнішньому куті квартала, а найменша – в центрі квартала. Різниця в цьому випадку досягає до 2 разів.

5. Розміри екологічної безпечної ситуації в значній мірі залежать від пожежного ризику об'єкта. Зменшення пожежного ризику призводить до зменшення виникнення обсягу екологічної безпечної ситуації.

6. На екологічну безпеку в значній мірі впливає швидкість вітру. Зменшення швидкості вітру при пожежі на відкритих складах лісоматеріалів, наприклад, в два рази, зменшує об'єм розповсюдження продуктів горіння приблизно в два рази. При цьому в деяких випадках за рахунок збільшення концентрації токсичних продуктів від пожежі у зменшеному об'ємі унеможливується перебування людини на цій території.

7. Для зменшення розмірів або запобігання екологічної безпеки необхідно впроваджувати на складах лісоматеріалів заходи протипожежної безпеки за рахунок практичної реалізації адміністративно-правових і економічних методів.

## **РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ СИЛ І ЗАСОБІВ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖІ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ**

### **4.1. Вихідні положення**

Основним проблемним питанням теорії прийняття рішення, є визначення критерія для прийняття рішення в умовах невизначеності [159]. Відносно оптимізації тривалості часу локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах є оцінка мінімальних витрат та збитків, які пов'язані з ліквідацією пожежі, та використанням для її ліквідації оптимальної кількості сил і технічних засобів. Основними документами пожежно-рятувальних підрозділів для організації процесу ліквідації пожежі на об'єкті є оперативні плани та картки пожежогасіння.

Оперативний план – це документ, в якому передбачається розроблення питань організації гасіння пожежі на об'єкті з використанням необхідних оперативно-тактичних прийомів, сил і технічних засобів пожежогасіння. Оперативні плани розробляють для важливих пожежонебезпечних об'єктів. На всі інші об'єкти розробляють картки пожежогасіння. Вказані документи розробляють заздалегідь на підставі суб'єктивних поглядів розробника. Використання пожежно-рятувальними підрозділами для організації процесу ліквідації пожежі на об'єкті оперативних планів або карток пожежогасіння в більшості випадків призводить до значних збитків. Наприклад, в Україні за 2014 рік тільки прямі збитки від пожеж склали 1489741 тис. грн [102]. Вказані збитки за статистикою з кожним роком збільшуються. Наприклад, у 2014 році вони збільшилися у 2,2 рази у порівнянні з 2013 роком. Наведені збитки від пожеж можна пояснити головним чином за рахунок розроблення на неналежному рівні оперативних планів і карток пожежогасіння, в яких в умовах невизначеності не наведена потрібна кількість сил і засобів ліквідації пожежі для відповідного об'єкту.



Для зменшення збитків від пожежі необхідно в першу чергу знати кожному пожежно-рятувальному підрозділу і відповідно дотримуватися оптимальної тривалості часу вільного розвитку пожежі, локалізації, гасіння та ліквідації пожежі на об'єкті, на якому вона виникла. Тому для кожного об'єкта необхідно розробляти декілька варіантів оперативних планів або карток пожежогасіння і на підставі їх аналізу з використанням відповідного критерія оптимізації приймати найбільш раціональний варіант ліквідації пожежі, який би забезпечував визначений критерій. Але в практичній діяльності пожежно-рятувальних підрозділів такий підхід практично відсутній. В першу чергу це пов'язано з тим, що існуючі критерії не охоплюють всіх основних чинників ліквідації пожежі. На цій основі ставиться проблема у визначенні такого критерія, який би забезпечував вибір обґрунтованого варіанта ліквідації пожежі та забезпечував мінімальні збитки від пожежі як для об'єкта так і для пожежно-рятувального підрозділу на її ліквідацію. Тому розв'язування проблеми визначення критерія прийняття рішення для оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах є важливою і актуальною задачею сьогодення.

#### **4.2. Вибір та обґрунтування критерія оптимізації**

Для розроблення оперативних планів і карток пожежогасіння для кожного об'єкта необхідно на підставі основних положень теорії прийняття рішень прийняти найбільш вірогідне рішення  $P_{i,j}$  по ліквідації пожежі з його оцінкою за відповідним варіантом  $B_i$  та умовами  $Y_j$ , які можуть характеризуватися відповідними економічними показниками [162, 179, 250, 243, 138, 138]. Такими показниками можуть бути, наприклад, витрати у вигляді прямих збитків об'єкта від пожежі  $B_{o,j}(\tau)$  та витрати пожежно-рятувальних частин  $B_m(\tau)$  на ліквідацію пожежі за  $i$ -им варіантом прийнятого рішення в  $j$ -ій ситуації розвитку пожежі [179]

$$P_{ij} = B_{oj}(\tau) + B_{ni}(\tau). \quad (4.1)$$

Використовуючи рівняння (4.1) в пожежній практиці розглядають такі основні критерії для оптимізації тривалості часу ліквідації пожежі: 1) мінімакський критерій (ММ) на основі пессимістичної позиції; 2) критерій Байєса-Лапласа; 3) критерій Севіджа; 4) критерій Гурвіца; 5) критерій Ходжа-Лемана; 6) критерій Гермейєра; 7) критерій добутку; 8) критерій Нейтралітету; 9) оптимістичний критерій [138]. Наведені критерії можна використовувати при умові орієнтовного прогнозу виникнення пожежних ситуацій та розрахунку відповідної кількості сил і засобів для ліквідації пожежі при різних ситуаціях її розвитку. Для оптимізації задач, які пов'язані з ліквідацією пожеж, такий підхід є дуже складним і не обґрунтованим. Результати досліджень [138] показують, що в більшості випадків відсутні статистичні дані для точного розрахунку значення  $P_{ij}$ . Тому в пожежній практиці доцільно використовувати тільки критерій Севіджа або мінімакський критерій (ММ) на основі пессимістичної позиції. Використання цих критеріїв для прийняття рішень не завжди дає оптимальні результати, але на їх основі можна отримати лише «достатньо» раціональні рішення [138].

Для прийняття рішення по ліквідації пожежі в умовах невизначеності використовують також так званий різницевий критерій, який складається з двох часткових критеріїв [146]. Цей критерій представляє різницю між прямими збитками об'єкта від пожежі  $B_o$  (перший частковий критерій) та витратами пожежно-рятувальних підрозділів  $B_n$ , які беруть участь в її ліквідації (другий частковий критерій). За модулем ця різниця повинна наближатися до мінімального значення і навіть може дорівнювати нулю

$$|B_o - B_n| \Rightarrow \min, \quad (4.2)$$

Результати аналізу останніх досліджень і публікацій показали, що для визначення критерія прийняття рішення в умовах невизначеності в пожежній

практиці при розроблені оперативних планів і карток пожежогасіння найбільш доцільними на сучасному етапі є такі критерії: критерій Севіджа, мінімакський критерій (ММ) на основі пессимистичної позиції та різницевий критерій. На підставі цього висновку ставиться мета, яка полягає в розроблені метода визначення більш досконалого за своїм значенням критерія прийняття рішення для оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах.

Для постановки задачі скористаємося значеннями прогнозованої тривалості часу з моменту виникнення пожежі до початку її локалізації (прогнозований час вільного горіння  $\tau_{в.г}$ ) та тривалістю часу зайнятості сил пожежно-рятувальних підрозділів (ПРП) на повну ліквідацію пожежі (прогнозований час зайнятості ПРП  $\tau_{з.н.н}$ ):

– прогнозований час вільного горіння

$$\tau_{в.г} = \tau_{в.в} + \tau_{сн} + \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз}, \quad (4.3)$$

де:  $\tau_{в.в}$  – час з моменту виникнення до моменту виявлення пожежі, хв;

$\tau_{сн}$  – час з моменту виявлення пожежі до моменту сповіщення про неї в пожежно-рятувальний підрозділ, хв;

$\tau_{о.о}$  – час на отримання та опрацювання сповіщення про пожежу, хв;

$\tau_{з.с}$  – час на залучення сил та засобів гарнізону для гасіння пожежі, хв (наказ МВС України №325 від 01.07. 1993);

$\tau_{зб}$  – час збору особового складу, хв;

$\tau_{сл}$  – час слідування на пожежу, хв;

$\tau_{роз}$  – час оперативного розгортання, хв;

– прогнозований час зайнятості ПРП для ліквідації пожежі

$$\tau_{з.н.н} = \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз} + \tau_{лок} + \tau_2 + \tau_{лік}, \quad (4.4)$$

$\tau_{лок}$  – час локалізації пожежі, хв;

$\tau_z$  – час гасіння пожежі, хв;

$\tau_{лік}$  – час на закінчення ліквідації пожежі (остаточне гасіння), хв.

Значення складових  $\tau_{в.в}$ ,  $\tau_{сп}$ ,  $\tau_{о.о}$ ,  $\tau_{з.с}$ ,  $\tau_{зб}$ ,  $\tau_{роз}$  залежностей (4.3) і (4.4) наведені роботі [37] та в нормативному документі [166]. Для визначення складової  $\tau_{сл}$  використовують залежність

$$\tau_{сл} = \frac{60Lk_n}{V_{сл}}, \quad (4.5)$$

де  $L$  – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, на якому виникла пожежа, км;

$k_n$  – коефіцієнт, який враховує не прямолінійність вуличної мережі (в містобудівельній практиці його максимальне значення приймають  $k_n = 1,4$ );

$V_{сл}$  – середня швидкість руху пожежних автомобілів, км/год (в денний час  $V_{сл} = 32$  км/год; вночі – до 60 км/год [157]).

Значення тривалості часу локалізації  $\tau_{лок}$  можна визначити за залежністю [124, 191]

$$\tau_{лок} = \frac{6,39S_{лок}^{0,893}}{2N_A + N_B^I} K_I K_d, \quad (4.6)$$

де  $S_{лок}$  – площа локалізації, м<sup>2</sup>;

$K_I$  – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання  $I_n^I$  (л/м<sup>2</sup>с) в осередок пожежі вогнегасної речовини (рекомендоване значення для ручних стволів  $I_n^I = 0,2$  л/м<sup>2</sup>с);

$K_d$  - коефіцієнт, який враховує вплив діаметра насадки  $d$  (мм) ствола (рекомендоване значення діаметра насадки для ручних стволів  $N_B d = 13$  мм; для стволів  $N_A d = 19$  мм; у випадку використання стволів  $A$  і  $B$  приймають середнє значення  $d = 16$  мм);

для кругової і кутової пожеж  $S_{лок} = \alpha h[10V_{л} + 2V_{л}(\tau_{в.з} - 10) - h]$ ;

$V_{л}$  – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/хв;

$h$  – глибина подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі ( $h = 5$  м для ручних стволів [92]), м;

$$K_l = 1,62 - 3,04I_n^r; K_d = 1,4983 - 0,0262d;$$

$\alpha$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі: кругова ( $360^\circ$ )  $\alpha = 3,14$  рад; кутова ( $180^\circ$ )  $\alpha = 1,57$  рад; кутова ( $90^\circ$ )  $\alpha = 0,785$  рад;  $N_B^r$  - кількість стволів  $B$  на локалізацію і гасіння пожежі [157]

$$N_A^{\bar{A}} = \frac{S_{\bar{r}}^{2\bar{A}}}{Q_{\bar{A}}}; \quad (4.7)$$

$N_A^C$  - кількість стволів  $B$  на захист

$$N_A^C = \frac{0,25K_c S_{\bar{r}}^{2\bar{A}}}{Q_B}; \quad (4.8)$$

$Q_B$  – розхід вогнегасної речовини стволом  $B$ , л/с (розхід при тиску вогнегасної речовини 0,4 МПа і діаметру насадки  $d = 13$  мм становить 3,7 л/с);

$K_3 = 2,0 \dots 2,2$  – коефіцієнт, який враховує збільшення площі захисту у порівнянні з площею пожежі;

$N_A$  - кількість стволів  $A$  на локалізацію і гасіння пожежі [157]

$$N_A = 0,3N_A^{\bar{A}}. \quad (4.9)$$

На підставі отриманих даних визначаємо загальну кількість стволів  $N_B = N_A^{\bar{A}} + N_A^C$  та  $N_\Sigma = N_A + N_A^{\bar{A}} + N_A^C$ . Крім цього, визначаємо потрібну кількість відділень  $N_g$  для ліквідації пожежі

$$N_g = 0,25(2N_A + N_A^{\bar{A}} + 0,17N_\Sigma + 2). \quad (4.10)$$

Складову  $\tau_2$  можна визначити за залежністю

$$\tau_2 = \tau_{лок} \left( \frac{S_{II}}{S_{лок}} - 1 \right), \quad (4.11)$$

де  $S_{II}$  – площа пожежі, м<sup>2</sup>.

Після цього визначаємо час  $\tau_{лік}$  на закінчення ліквідації пожежі (кінцева ліквідація спалахів після гасіння) за залежністю

$$\tau_{лік} = 0,25(\tau_{лок} + \tau_2). \quad (4.12)$$

Визначивши прогнозовані тривалості часів вільного розвитку пожежі та зайнятості ПРП для її ліквідації, ставимо для визначення критерія прийняття рішення для оптимізації процесу локалізації та гасіння пожежі на деревообробних підприємствах такі задачі: 1) визначити втрати об'єкта від тривалості вільного розвитку пожежі та її локалізації; 2) визначити втрати пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі; 3) встановити оптимальне значення критерія прийняття рішення для оптимізації процесу локалізації та гасіння пожежі на деревообробних підприємствах.

**Визначення втрат об'єкта.** Для визначення втрат об'єкта від пожежі скористуємося залежністю

$$B_o = C_o S_{II}, \quad (4.13)$$

де  $C_o$  – середня вартість одного квадратного метра площі об'єкта, яка знищена пожежею, грн/м<sup>2</sup>;

$S_{II}$  – площа об'єкта, яка знищена пожежею, м<sup>2</sup>.

Для визначення площі  $S_{II}$  скористуємося рекомендаціями роботи [176].

В цьому випадку отримаємо

$$S_{II} = S_{II1} + S_{II2} + S_{II3}, \quad (4.14)$$

де  $S_{П1}$  – площа пожежі за перші 10 хв тривалості вільного розвитку пожежі,  $m^2$ ;

$S_{П2}$  – площа пожежі за час тривалості вільного розвитку пожежі без урахування перших 10 хв,  $m^2$ ;

$S_{П3}$  – площа пожежі за час тривалості локалізації пожежі,  $m^2$ .

Визначаємо значення складових залежності (4.14). Площа пожежі за перші 10 хв тривалості вільного розвитку пожежі враховується на тій підставі, що початок її локалізації ПРП починає виконуватися за час значно більший ніж 10 хв. В цьому випадку площа пожежі  $S_{П1}$  можна визначити за залежністю

$$S_{П1} = (0,5V_l)^2 10^2 \alpha = 25V_l^2 \alpha. \quad (4.15)$$

Площа пожежі  $S_{П2}$  за час тривалості вільного розвитку пожежі без урахування перших 10 хв

$$S_{П2} = (\tau_{в.з} - 10)^2 V_l^2 \alpha. \quad (4.16)$$

Площа пожежі  $S_{П3}$  за час тривалості локалізації пожежі

$$S_{П3} = \tau_{лок}^2 (0,5V_l)^2 \alpha = 0,25\tau_{лок}^2 V_l^2 \alpha. \quad (4.17)$$

На підставі отриманих даних втрати об'єкта від пожежі будуть

$$B_o = C_o V_l^2 \alpha (\tau_{в.з}^2 - 20\tau_{в.з} + 0,25\tau_{лок}^2 + 125). \quad (4.18)$$

**Визначення втрат  $B_n$  пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі.** Для цього скористуємося середньою вартістю  $C_n$  однієї хвилини роботи ПРП в процесі ліквідації пожежі та результатом залежності (4.4). На підставі цих даних отримаємо

$$B_n = C_n \tau_{з.п.п}. \quad (4.19)$$

**Встановлення оптимального значення критерія прийняття рішення** для оптимізації процесу локалізації та гасіння пожежі. Для визначення значення критерія скористуємося залежностями (4.18), (4.19) і (4.4). На підставі цих залежностей запишемо розгорнуту суму рівнянь (4.18) і (4.19)

$$y = C_o V_l^2 \alpha \tau_{в.з}^2 - 20 C_o V_l^2 \alpha \tau_{в.з} + 0,25 C_o V_l^2 \alpha \tau_{лок}^2 + 125 C_o V_l^2 \alpha + C_n \tau_{о.о} + \\ + C_n \tau_{з.с} + C_n \tau_{зб} + C_n \tau_{сл} + C_n \tau_{роз} + 1,25 C_n \left( \frac{S_{II}}{S_{лок}} - 1 \right) \tau_{лок} + 0,25 C_n \tau_{лок}. \quad (4.20)$$

Визначаємо похідну по часу  $\tau$  від функції (4.20) та прирівнюємо її значення до нуля

$$\frac{dy}{d\tau} = C_o V_l^2 \alpha (2\tau_{в.з} - 20) + 0,5 C_o V_l^2 \alpha \tau_{лок} + 5,25 C_n + 1,25 C_n \left( \frac{S_{II}}{S_{лок}} - 1 \right) = 0. \quad (4.21)$$

На підставі залежності (4.21) визначаємо оптимальне значення тривалості часу локалізації пожежі для прийнятих умов ліквідації пожежі, перепозначивши всі змінні часи вздовж осі  $x$  через  $\tau$

$$\tau_{лок.оп} = 8 - \frac{C_n \left[ 4 + 1,25 \left( \frac{S_{II}}{S_{лок}} \right) \right]}{2,5 C_o V_l^2 \alpha}. \quad (4.22)$$

Тривалість гасіння пожежі визначаємо з використанням залежності (4.11), а тривалість закінчення ліквідації пожежі за залежністю (4.12). Крім цього, при умові використання залежності (4.6) можна виконати перевірку правильності прийняття необхідної кількості приладів для локалізації та гасіння пожежі. В цьому випадку повинна виконуватися умова



$$\tau_{\ddot{e} \dot{e}} = \frac{6,39 \{ \alpha h [10V_{\ddot{e}} + 2V_{\dot{e}}(\tau_{\dot{a}\dot{a}} - 10) - h] \}^{0,893}}{2N_A + N_A^{\bar{A}}} K_I K_d \leq \tau_{\ddot{e} \dot{e} i i} . \quad (4.23)$$

Виконання умови (4.23) дозволяє отримати в процесі ліквідації пожежі на об'єкті мінімальні втрати як для об'єкта, так і для пожежно-рятувальних підрозділів, тобто в цьому випадку

$$B_o + B_n \Rightarrow B_{\min} . \quad (4.24)$$

Результати виконаних досліджень дозволили зробити такі висновки:

- аналіз існуючих критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності дав можливість розробити критерій для оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах;
- за основу при розробленні критерія оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж було прийнято тривалість часу для виконання операції локалізації, що дозволяє обґрунтовано перевіряти загальну кількість приладів для ліквідації пожежі загалом;
- розроблений критерій оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж дає можливість обґрунтовано виконувати розроблення оперативних планів і карток пожежогасіння для деревообробних підприємств.

#### **4.3. Статистичне моделювання надійності пожежної техніки для локалізації та гасіння пожежі**

Процес успішної локалізації та гасіння пожежі на будь-якому об'єкті залежить від професійної майстерності пожежних, їх бойової готовності, мобільного керування тактикою гасіння та надійності пожежної техніки. З наведеного переліку факторів, які впливають на процес ліквідації пожежі, можна виділити найбільш впливовий – надійність пожежної техніки.

Наприклад, в роботі [53] вказується, що в наслідок відмов пожежної техніки в процесі ліквідації пожежі її тривалість може збільшуватися в 1,25...2 рази, що призведе до збільшення втрат як для об'єкта, так і для пожежно-рятувального підрозділу.

Згідно із стандартом ДСТУ 2860-94 основними показниками надійності є імовірність безвідмовної роботи  $R(\tau)$  та коефіцієнт готовності  $A(\tau)$  кожного складового елемента та системи загалом. Результати аналізу існуючих стандартів стосовно пожежно-рятувального обладнання та техніки (ДСТУ 3687-98, ДСТУ 2111-92, ДСТУ 2112-92, ДСТУ 2802-94, ДСТУ-П 7290:2012 та інших), а також науково-технічної [195, 247] та довідникової літератури показали, що для пожежно-рятувального обладнання та техніки відсутні значення основних показників надійності. В деяких стандартах наведено тільки значення напрацювання на відмову, але в більшості випадків вони є не обґрунтованими. Тому виникає проблема у визначенні хоча б в деякій мірі наближених до дійсних значень основних показників надійності пожежної техніки для локалізації та гасіння пожежі, що дозволить з їх урахуванням забезпечити якісний процес ліквідації пожежі.

Перші дослідження надійності технічних об'єктів розпочалися на початку 1945 року в США. Причиною цих досліджень стали багаточисельні відмови військової техніки, яка призначалася для бойових дій. Наприклад, 60% літаків, призначених для бойових дій на Далекому Сході, виявилися недієздатними [77]. Для розв'язування задач, які були пов'язані з надійністю технічних об'єктів, почали розвиватися роботи по виконанню експериментальних досліджень для визначення фактичної надійності і на цій основі почала створюватися математична теорія надійності. Значний вклад в цьому напрямку внесли Б.І. Костецький, О.С. Проніков, Д.М. Решетов та багато інших.

Стосовно надійності пожежної техніки в 90 роках минулого століття були розроблені ДСТУ, в яких почали вводити значення показників надійності. Наприклад, в ДСТУ 3286-95 (ГОСТ 26938-95) (Автомобілі

гасіння. Загальні технічні умови), який пізніше був замінений ДСТУ-П 7290:2012, наведено значення тривалості напрацювання на відмову у вигляді пробігу автомобілем 5000 км при швидкості руху 50 км/год, що відповідає  $T_B = 100$  год. Але крім цього показника надійності в стандарті нічого не наведено. Тому не можливо щось прогнозувати стосовно імовірності безвідмовної роботи. Крім цього, наведене значення  $T_B = 100$  год є не обґрунтованим.

В 1988 році вийшла робота [206], в якій пропонується для уточнення  $T_B$  метод статистичного моделювання, тобто методика для уточнення значень показників надійності. В нашій країні одними із перших робіт, які були присвячені визначенню основних показників надійності пожежної техніки, були роботи [54, 155]. Аналізуючи результати цих робіт можна зауважити, що наведена методика визначення основних показників надійності пожежної техніки базується на даних напрацювання на відмову  $T_B$ , які наведені в ДСТУ. При цьому не враховувалося зменшення тривалості напрацювання на відмову внаслідок певного часу експлуатації пожежної техніки, а також надійність її структурних складових. Але, навіть при наявності розглянутих результатів досліджень, виникає проблема в тому, що зовсім не розглядалося визначення основних показників надійності для пожежної техніки як для системи, яка складається з багатьох складових елементів. Тому ставиться задача розробити методологію визначення основних показників надійності пожежної техніки з урахуванням надійності кожного її складового конструктивного елемента та відповідно забезпечення якісної локалізації та гасіння пожежі.

Для розв'язування поставленої проблеми ставиться мета розглянути методологію визначення основних показників надійності пожежної техніки, з урахуванням якої забезпечується можливість якісної локалізації та гасіння пожежі. Для забезпечення виконання поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі: 1) обґрунтувати вибір основних типів пожежної техніки з виділенням блоків надійності ліквідації пожеж на деревообробних

підприємствах; 2) визначити значення основних показників надійності конструктивних елементів кожного блоку пожежної техніки з використанням методу статистичного моделювання; 3) розробити метод врахування основних показників надійності пожежної техніки при визначенні її необхідної кількості для ліквідації пожежі.

Для вирішення поставленої проблеми переходимо до розв'язання поставлених задач.

**1. Вибір основних типів пожежної техніки для ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах.** Гасіння пожеж на деревообробних підприємствах головним чином здійснюється водою [181]. Тому для ліквідації пожежі в цьому випадку використовують автоцистерни пожежні типу АЦ. При прибутті пожежно-рятувальних підрозділів на об'єкт, де виникла пожежа, в процесі їх оперативного розгортання, в першу чергу необхідно поставити автоцистерни пожежні на найближчі вододжерела і розгорнути пожежні рукава від вододжерел до осередку пожежі, в тому числі від гідрантів кільцевої господарчо-пожежної водної магістралі високого тиску.

Виходячи з основних положень пожежної безпеки для деревообробних підприємств в процесі їх будівництва застосовують кільцеві господарчо-пожежні водні магістралі високого тиску. Тому в процесі оперативного розгортання пожежно-рятувального підрозділу для ліквідації пожежі використовують в першу чергу водні магістралі високого тиску.

Для забору води із гідрантів цієї магістралі використовують колонки пожежні типу КП У1 ДСТУ 2801 – 94. Від колонки пожежної за допомогою рукава пожежного типу Т У1 ДСТУ 3810 – 98 вода подається до автоцистерни. Розглянута система подачі води до автоцистерни є *першим блоком надійності* пожежної техніки.

*Другим блоком надійності* пожежної техніки є автомобіль гасіння типу АЦ. Для визначення надійності цього блоку виділимо основні конструктивні елементи, які впливають на її значення. До таких елементів можна віднести:

замок запалення автомобіля, акумулятор, реле стартера автомобіля, стартер, автомобільний двигун, коробка швидкостей, коробка відбору потужності, карданна передача, насос пожежний відцентровий.

До третього блоку надійності пожежної техніки відносять: рукав пожежний напірний від насосу пожежного відцентрового до триходового розгалуження рукавного, три паралельних рукава пожежних напірних, три паралельно працюючих пожежних стволів ручних, з яких один ствол  $A$ , а два стволи  $B$ .

**2. Визначення значень основних показників надійності конструктивних елементів кожного блоку пожежної техніки з використанням методу статистичного моделювання.** Для визначення основних показників надійності всіх блоків пожежної техніки скористуємося методом статистичного моделювання [77, 206]. Цей метод використовують для уточнення значення тривалості напрацювання на відмову. За основу для виконання методу статистичного моделювання використовують закон розподілу Вейбулла, а саме імовірність безвідмовної роботи

$$R(\tau) = \exp \left[ - \left( \frac{\tau}{T_B} \right)^b \right], \quad (4.25)$$

де  $\tau$  – тривалість виконання роботи елементом конструкції у часі або у циклах відповідним блоком пожежної техніки в процесі ліквідації пожежі;  $T_B$  – максимально можлива тривалість роботи елемента конструкції у часі або у циклах відповідного блока пожежної техніки до першої відмови;  $b$  – параметр форми кривої розподілу; у випадку коли  $b \leq 1$ , розподіл наближається до експоненціального закону; якщо  $1 \leq b \leq 2$  – розподіл наближається до закону розподілу Вейбулла; у випадку коли  $b > 2$  – розподіл стає близьким до нормального закону розподілу.

Використовуючи значення випадкових чисел  $X_i$  в інтервалі  $[0, 1]$  і приймаючи ці значення як імовірність безвідмовної роботи  $R_i(\tau)$ , можна

визначити значення тривалості  $\tau_i$  виконання роботи елементом конструкції у часі або у циклах з використанням залежності (4.25)

$$\tau_i = T_B \sqrt[b]{-\ln R_i(\tau)}. \quad (4.26)$$

Використовуючи залежність (4.26) та підставляючи в неї замість  $R_i(\tau)$  випадкові числа  $X_i$ , можна статистичним моделюванням визначити: 1) параметри розподілу  $T_B$  і  $b$  у випадку, якщо напрацювання  $\tau$  встановлено експериментально; 2) напрацювання  $\tau$  за залежністю (4.26), якщо параметри розподілу  $T_B$  і  $b$  відомі для аналогічних виробів чи систем. В нашому випадку будемо використовувати перший напрямок моделювання.

Статистичну оцінку імовірності того, що час безвідмовної роботи  $\tau$  системи не перевищує  $\tau_i$ , визначаємо за залежністю [77]

$$R(\tau_i) = 1 - \frac{i}{N+1}, \quad (4.27)$$

де  $i = 1; 2; 3; \dots; n$  – цілі числа, які вказують номер проведення числового експерименту;  $N$  – загальна кількість проведених числових експериментів (реалізація випадкового процесу).

Для розгляду розподілу отриманих значень методу статистичного моделювання за основу приймають графічний метод з використанням пакета прикладних програм Microsoft Excel. Після побудови графічної залежності на неї накладають лінію тренда з отриманням рівняння прямої, яка не проходить через початок координат, у вигляді

$$y = bx - c \quad (4.28)$$

де  $b$  – параметр форми, який дорівнює  $\operatorname{tg}\alpha$ , тобто тангенсу кута нахилу  $\alpha$  лінії тренда до осі  $X$ .

Після виконання не складних математичних перетворень залежності (4.25), тобто подвійного логарифмування, отримуємо

$$\lg(-\lg R(\tau_i)) = b \lg \tau_i - c ; \quad (4.29)$$

$$c = 0,362 + b \lg T_B . \quad (4.30)$$

Тоді

$$T_B = 10^{\frac{c-0,362}{b}} . \quad (4.31)$$

На підставі розглянутого методу статистичного моделювання визначимо основні показники надійності конструктивних елементів кожного блоку пожежної техніки. Почнемо з першого блоку пожежної техніки, до якого входять: колонка пожежна типу КП У1 ДСТУ 2801 – 94, рукав пожежний типу Т У1 ДСТУ 3810 – 98.

*Колонка пожежна* типу КП У1 ДСТУ 2801 – 94. Для оцінки надійності колонки пожежної розраховуємо десять ( $N=10$ ) значень напрацювання системи до відмови. Розподіл напрацювання системи приймаємо відповідно до закону розподілу з параметрами  $T_B=300$  циклів (згідно із ДСТУ 2801 – 94),  $b = 2$ . Результати моделювання розподілу напрацювання на відмову заносимо до табл. 4.1, на підставі яких будуюмо графічну залежність (рис. 4.1).

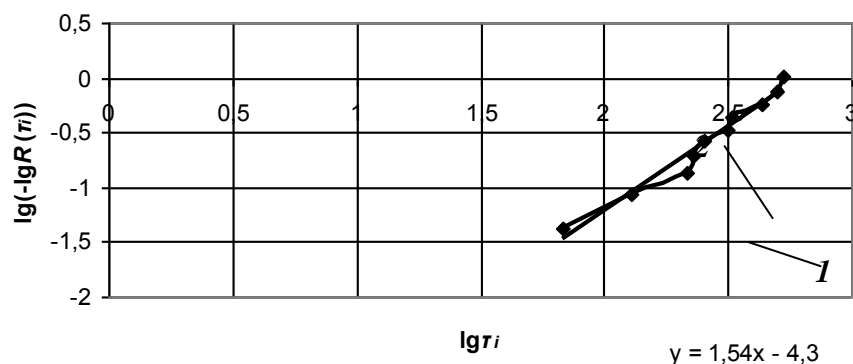


Рис. 4.1. Розподіл напрацювання на відмову колонки пожежної:

1-крива розподілу; 2-лінія тренда

Отримавши залежність (4.28) виду  $y = 1,54x - 4,3$  (рис. 4.1), визначаємо уточнене значення напрацювання колонки пожежної на відмову за умови, що  $b = 1,54$ , а  $c = 4,3$

$$T_B = 10^{\frac{4,3-0,362}{1,54}} = 360 \text{ циклів.}$$

Таблиця 4.1

Результати статистичного моделювання надійності колонки пожежної  
типу КП У1 ДСТУ 2801 – 94

№ з/п	$i (N=10)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Випадкові значення $X_i$	0,60	0,33	0,55	0,12	0,29	0,50	0,05	0,95	0,07	0,83
2	Напрацювання до відмови $\tau_i$ , циклів за залежністю (2)	214	315	232	437	334	250	519	68	489	130
3	Впорядкований ряд $\tau_i$ , циклів	68	130	214	232	250	315	334	437	489	519
4	$R(\tau_i)$ за залежністю (3)	0,91	0,82	0,73	0,64	0,55	0,46	0,36	0,27	0,18	0,09
5	$\lg \tau_i$	1,83	2,11	2,33	2,36	2,40	2,50	2,52	2,64	2,70	2,72
6	$\lg(-\lg R(\tau_i))$	-1,38	-1,06	-0,86	-0,71	-0,58	-0,47	-0,36	-0,25	-0,13	0,02

Враховуючи, що колонка пожежна знаходиться в експлуатації певний час, а за одну ліквідацію пожежі на ній виконують до 10 циклів вмикань, то можна прийняти тільки залишок циклів для врахування напрацювання на відмову, який дорівнює в середньому  $T_B = 180$  циклам. Тоді імовірність безвідмовної роботи за законом розподілу Вейбулла буде

$$R(10) = \exp\left[-\left(\frac{10}{180}\right)^{1,54}\right] = 0,945.$$

Визначена імовірність безвідмовної роботи  $R(10) = 0,945$  відповідає цьому значенню у випадку, коли коефіцієнт готовності  $A(\tau)$  буде дорівнювати



$$A(\tau) = \frac{T_B}{T_B + T_{\text{від}}} = \frac{180}{180 + 4} = 0,978,$$

де  $T_{\text{від}}$  – тривалість відновлення колонки пожежної після першої відмови;  $T_{\text{від}} = 4$  год [192].

Аналогічно були визначенні значення тривалості напрацювання на відмову, імовірності безвідмовної роботи та коефіцієнти готовності для всіх для всіх трьох блоків надійності пожежної техніки з використанням джерел [181, 155, 92, 247, 160, 76, 85]. Крім цього, тривалість напрацювання пожежної техніки в процесі ліквідації пожежі  $\tau = 4$  год була визначена як середньостатистичне значення тривалості її ліквідації на деревообробних підприємствах (с. Блоставиця, Київська область; м. Костопіль, Рівненська область; смт Новий Яричів, Кам'яно-Бузьського району, Львівської області та багато інших). Результати цих розрахунків наведені в табл. 4.2.

На підставі отриманих даних по імовірності безвідмовної роботи пожежної техніки та спорядження є можливість визначити імовірність безвідмовної роботи всього комплексу пожежної техніки для ліквідації пожежі.

*Перший блок* пожежної техніки уявляє систему з послідовним з'єднанням елементів, відмови яких статистично незалежні. В цьому випадку імовірність безвідмовної роботи такої системи можна визначити так

$$R_{B1}(\tau) = \prod_{i=1}^{n_1} R_i(\tau), \quad (4.32)$$

де  $n_1$  – кількість елементів пожежної техніки в першому блоці;  $R_i(\tau)$  – імовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента.

*Другий блок* пожежної техніки так як і перший уявляє систему з послідовним з'єднанням елементів. Імовірність безвідмовної роботи визначаємо за аналогією першого блоку

$$R_{B2}(\tau) = \prod_{i=1}^{n_2} R_i(\tau), \quad (4.33)$$

де  $n_2$  – кількість елементів пожежної техніки в другому блоці.

Таблиця 4.2

Результати розрахунків показників надійності  
трьох блоків пожежної техніки

№ з/п	Назва, тип, модель устаткування або спорядження	Тривалість напрацювання на відмову $T_B$	Тривалість напрацювання в процесі ліквідації пожежі $\tau$	Імовірність безвідмовної роботи $R(\tau)$	Коефіцієнт готовності $A(\tau)$
1	2	3	4	5	6
<i>Перший блок пожежної техніки</i>					
1	Колонка пожежна типу КП У1 ДСТУ 2801 – 94	180 циклів	10 циклів	0,945	0,978
2	Рукав пожежний типу Т У1 ДСТУ 3810 – 98	8600 год	4 год	0,9995	0,99
<i>Другий блок пожежної техніки</i>					
3	Замок запалення автомобіля АЦ, АНР, АА, АВ, АКТ	1060 год	4 год	0,996	0,99
4	Акумулятор	9120 год	4 год	0,9996	0,87
5	Реле стартера автомобіля АЦ, АНР, АА, АВ, АКТ	9600 год	4 год	0,9996	0,996
6	Стартер автомобіля АЦ, АНР, АА, АВ, АКТ	2200 год	4 год	0,998	0,948
7	Двигун автомобіля АЦ, АНР, АА, АВ, АКТ	320 год	4 год	0,987	0,85
8	Коробка швидкостей автомобіля АЦ, АНР, АА, АВ, АКТ	4500 год	4 год	0,999	0,984
9	Коробка відбору потужності КВП -68Б, КВП-ПМ-102А, КВП-107	5000 год	4 год	0,999	0,986
10	Карданна передача від коробки відбору потужності до насоса	100 год	4 год	0,961	0,88
11	Пожежний відцентровий насос ПН-40; ПН-60; ПН-110	150 год	4 год	0,973	0,86

*Третій блок* пожежної техніки включає один рукав від насоса до триходового розгалуження ( $R_1(\tau)$ ), а потім виконується розгалуження на три паралельні напрямки, яке закінчується трьома ручними пожежними стволами. Імовірність безвідмовної роботи пожежної техніки для цього блоку можна визначити так

$$R_{B_3}(\tau) = R_1(\tau) \left[ 1 - \prod_{i=2}^{n_3} (1 - R_i(\tau)) \right], \quad (4.34)$$

де  $n_3$  – кількість елементів пожежної техніки в третьому блоці.

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6
	<i>Третій блок пожежної техніки</i>				
	Рукав пожежний напірний типу				
12	Т У1 ДСТУ 3810 – 98 від насосу до триходового розгалуження	8600 год	4 год	0,9995	0,99
	Триходове розгалуження рукавне типу				
13	РТ-70 У ДСТУ 2111-92 (на кожний рукав)	200 циклів	10 циклів	0,951	0,98
	Три паралельних рукава пожежних напірних типу				
14	Т У1 ДСТУ 3810 – 98 (на кожний рукав)	8600 год	4 год	0,9995	0,99
	Три паралельно працюючих пожежних ручних стволів (на кожний ствол)				
15		160 циклів	16 циклів	0,905	0,91

### **3. Метод врахування основних показників надійності пожежної техніки при визначенні її необхідної кількості для ліквідації пожежі.**

На першому етапі визначимо значення імовірності безвідмовної роботи всієї системи для ліквідації пожежі

$$R_c(\tau) = \prod_{i=1}^3 R_{B_i}(\tau). \quad (4.35)$$

На другому етапі врахуємо значення  $R_c(\tau)$  (надійності) при визначенні необхідної кількості пожежної техніки для ліквідації пожежі.

$$N_{A_i} = \frac{N_A^A + N_A^C}{R_c(\tau)}, \quad (4.36)$$

де  $N_A^A$ ,  $N_A^C$  - загальна кількість стволів  $B$  на гасіння і захист, яка визначена без урахування надійності пожежної техніки.

Після цього визначають кількість стволів  $A$  ( $N_A$ ) на гасіння від загальної кількості стволів  $N_A^{\bar{A}}$  на підставі рекомендацій [92]:

$$N_{A_i} = \frac{0,3N_A^{\bar{A}}}{R_c(\tau)}. \quad (4.37)$$

Розглянемо вплив значення імовірності безвідмовної роботи всієї системи для ліквідації пожежі на зміну кількості пожежної техніки. Для цього скористуємося даними табл. 4.2 та залежностями (4.32) – (4.37). Результати розрахунків показали, що для забезпечення ліквідації пожежі при урахуванні надійності пожежної техніки необхідно її кількість збільшувати на 16,4%.

Результати аналізу запропонованого методу статистичного моделювання дозволили зробити такі висновки:

- використання методу статистичного моделювання дозволило визначити імовірності безвідмовної роботи всіх конструктивних елементів всієї системи ліквідації пожежі, яка складається з трьох блоків. Найменшу імовірність безвідмовної роботи, як показали розрахунки, має другий блок, а саме автомобіль гасіння типу АЦ ( $R_{Б2}(\tau) = 0,915$ );
- основним показником надійності ремонтпридатної пожежної техніки є коефіцієнт готовності, на значення якого впливає, в першу чергу, час, який витрачається на ліквідацію відмови (ремонт) та середнє напрацювання на відмову. Для пожежної техніки значення коефіцієнта готовності коливається в межах від 0,86 до 0,99;
- для забезпечення ліквідації пожежі необхідно при визначені кількості пожежної техніки враховувати її надійність. Результати досліджень показують, що при врахуванні надійності кількість пожежної техніки необхідно збільшувати на 16,4%. При визначені, наприклад, 10 стволів

за існуючою методикою, їх кількість необхідно збільшити на 2 ствола і відповідно кількість пожежних.

#### **4.4. Оптимізація сил і засобів ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах з урахуванням надійності пожежної техніки**

##### **4.4.1. Оптимізація сил і засобів ліквідації пожежі в приміщенні будівлі цеху**

Стосовно розробленню математичної моделі оптимізації сил і засобів ліквідації пожеж в закритих приміщеннях можна зауважити, що таких моделей ще не розглядалося [213, 227, 33, 163, 30]. Але були виконані роботи стосовно визначення часу гасіння пожежі в залежності від кількості одиниць відповідних приладів для її гасіння [154]. Крім цього, при визначенні засобів ліквідації пожежі зовсім не враховувалася їх надійність. На кількість засобів і сил ліквідації пожежі в першу чергу впливає тривалість вільного розвитку пожежі, від якої залежить величина її площі [262].

На підставі нормативних і статистичних даних можна за залежністю (4.3) визначити середнє значення тривалості вільного розвитку пожежі, яка дорівнює  $\tau_{в.г} = 35,9$  хв.

Аналізуючи отриманий результат, можна зробити висновок, що час тривалості вільного розвитку пожежі значний, тобто за цей час на об'єкті, на якому виникла пожежа, відбудуться від її дії значні збитки. Тому необхідно по можливості швидко локалізувати і ліквідувати пожежу. Для цього необхідно для кожного виду пожежі терміново проводити оптимізацію сил і засобів ліквідації пожежі, що в більшості випадків зменшує збитки як для об'єкта, так і втрати для пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі [298, 254, 62, 63, 273, 274, 64]. Для розроблення алгоритму оптимізації сил і засобів необхідно розглянути декілька етапів його створення.

На *першому* етапі визначаємо площу пожежі за час її вільного розвитку. Для цього виходимо з основних положень теорії розповсюдження пожежі. За перші 10 хв пожежі швидкість її розповсюдження дорівнює  $0,5V_l$ , де:  $V_l$  – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/хв. За час більше 10 хв швидкість розповсюдження пожежі дорівнює  $V_l$ . В цьому випадку:

$$\tau_{\text{в.з.}} = \tau_{\text{в.з.1}} + \tau_{\text{в.з.2}},$$

де  $\tau_{\text{в.з.1}} \leq 10$  хв;  $\tau_{\text{в.з.2}} > 10$  хв.

Тоді радіус розповсюдження пожежі відповідно буде

$$R = R_1 + R_2.$$

За такої умови площа кругової або кутової пожежі за час  $\tau_{\text{в.з.}} \leq 10$  хв буде

$$S_{\text{II}} = 0,25V_l^2 \tau_{\text{в.з.1}}^2 \alpha, \quad (4.38)$$

де  $\alpha$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі: кругова  $360^\circ$   $\alpha = 3,14$  рад; кутова  $180^\circ$   $\alpha = 1,57$  рад; кутова  $90^\circ$   $\alpha = 0,785$  рад.

Площа кругової або кутової пожежі за умови  $\tau_{\text{в.з.}} > 10$  хв буде

$$S_{\text{II}} = [0,25V_l^2 \cdot 10^2 + (\tau_{\text{в.з.}} - 10)^2 V_l^2] \alpha = [25 + (\tau_{\text{в.з.}} - 10)^2] V_l^2 \alpha. \quad (4.39)$$

Для прямокутної пожежі при її ширині  $b_n$  за умови, що  $\tau_{\text{в.з.}} \leq 10$  хв площа пожежі буде

$$S_{\text{III}} = 0,5b_n V_l \tau_{\text{в.з.1}}. \quad (4.40)$$

У випадку коли  $\tau_{\text{в.з.}} > 10$  хв площа прямокутної пожежі буде

$$S_{II} = b_n V_{л} (\tau_{в.з} - 5). \quad (4.41)$$

На *другому* етапі визначаємо кількість приладів для подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі. Для цього скористуємося залежностями (4.7)...(4.9), які використовуються для визначення необхідної кількості пожежних стволів без урахування надійності роботи системи пожежогасіння об'єкта [65]. З урахуванням імовірності безвідмовної роботи  $R_c(\tau)$  (надійності) системи пожежогасіння об'єкта кількість пожежних стволів визначаємо за залежностями

$$N_{A_H} = \frac{N_A}{R_c(\tau)}; \quad N_{A_f}^{\bar{A}} = \frac{N_{A_f}^{\bar{A}}}{R_c(\tau)}; \quad N_{A_f}^C = \frac{N_{A_f}^C}{R_c(\tau)}. \quad (4.42)$$

Значення кількості кожного ствола заокруглюють до цілого числа в більшу сторону. На підставі отриманих даних визначаємо загальну кількість стволів  $N_{\Sigma}$  і стволів  $N_{A_f}$  для ліквідації пожежі

$$N_{\Sigma} = N_{A_f} + N_{A_f}^{\bar{A}} + N_{A_f}^C; \quad (4.43)$$

$$N_{A_f} = N_{\Sigma} - N_{A_f}^{\bar{A}}. \quad (4.44)$$

На *третьому* етапі визначаємо потрібну кількість відділень  $N_{\bar{a}}$  для ліквідації пожежі

$$N_{\bar{a}} = 0,25(2N_{A_f} + N_{A_f}^{\bar{A}} + 0,17N_{\Sigma} + 2), \quad (4.45)$$

де 0,25 – коефіцієнт, який враховує середню чисельність особового складу для гасіння пожежі (4 чоловіка) одного відділення;  $2N_{A_H}$  – кількість особового складу для обслуговування стволів  $A$ ; 0,17 – коефіцієнт, який враховує кількість особового складу для допомоги водію встановлювати пожежні автомобілі на вододжерело, спостерігати за магістральними лініями,

працювати на розгалуженнях тощо; 2 – кількість особового складу, яка зайнята на постах безпеки та зв'язку.

Отримане значення  $N_g$  заокруглюють до цілого числа в більшу сторону.

На **четвертому** етапі визначаємо потрібну кількість пожежної техніки.

Загальна кількість пожежних:

- автоцистерн

$$N_{n.a} = N_g; \quad (4.46)$$

- спеціальних машин

$$N_{n.c} = 0,011N_n \geq 1, \quad (4.47)$$

де  $N_n$  – загальна кількість працюючих під час виникнення пожежі, яка знаходиться в приміщенні цеху.

Отримане значення  $N_{n.c}$  заокруглюють до цілого числа в більшу сторону. Спеціальні пожежні машини використовують для рятувально-евакуаційних відділень, які повинні мати у своєму розпорядженні індивідуальні пристрої для евакуації людей з осередку пожежі та розтяжний батут.

На **п'ятому** етапі визначаємо час тривалості локалізації, гасіння і ліквідації пожежі. Для цього скористуємося залежностями (4.11), (4.12) і (4.23).

$$\tau_{\text{вїв}} = \frac{6,39 \{ \alpha h [10V_{\text{в}} + 2V_{\text{в}}(\tau_{\text{д.д}} - 10) - h] \}^{0,893}}{2N_{A_f} + N_{A_f}^{\bar{A}}} K_l K_d; \quad (4.48)$$

$$\tau_z = \tau_{\text{лок}} \left( \frac{S_{\text{л}}}{S_{\text{лок}}} - 1 \right); \quad (4.49)$$

$$\tau_{\text{лік}} = 0,25(\tau_{\text{лок}} + \tau_z). \quad (4.50)$$

На підставі наведених залежностей визначаємо загальний час  $\tau_{\text{л}}$  тривалості ліквідації пожежі



$$\tau_l = \tau_{лок} + \tau_z + \tau_{лік} . \quad (4.51)$$

На *шостому* етапі визначаємо метод розрахунку критерія оптимізації. Для цього скористуємося рекомендаціями [157]. Оцінку наслідків ліквідації пожежі виконується за допомогою двох часткових критеріїв, тобто використовується сума прямих збитками від пожежі  $B_o$  (перший частковий критерій) та витрати пожежно-рятувальних підрозділів  $B_n$ , які брали участь в її ліквідації (другий частковий критерій). Ця сума в процесі розв'язування математичної оптимізаційної задачі повинна наближатися до мінімального значення, тобто можна записати

$$B_o + B_n \Rightarrow B_{\min} . \quad (4.52)$$

Значення цих часткових критеріїв для пожеж класу А можна визначити за залежностями (4.18) і (4.19)

$$B_o = C_o V_l^2 \alpha (\tau_{в.г}^2 - 20\tau_{в.г} + 0,25\tau_{лок}^2 + 125) ; \quad (4.53)$$

$$B_n = C_n \tau_{з.н.п} , \quad (4.54)$$

де  $\tau_{в.г}$  – тривалість вільного горіння за залежністю (4.3), хв;  $C_o$  – середня вартість одного квадратного метра площі об'єкта, яка знищена пожежею, грн/м<sup>2</sup>;  $C_n$  – середня вартість однієї хвилини роботи ПРП в процесі ліквідації пожежі, грн/хв;  $\tau_{з.н.п}$  – час зайнятості ПРП для ліквідації пожежі, хв.

З урахуванням залежності (4.51) значення  $\tau_{з.н.п}$  можна визначити так

$$\tau_{з.н.п} = \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз} + \tau_l . \quad (4.55)$$

На *сьомому* етапі переходимо до розгляду питань, які пов'язані з оптимізацією сил і засобів ліквідації пожежі в приміщеннях цехів

деревообробних підприємств. Для цього спочатку розглянемо вплив основних чинників на розвиток пожежі та на тривалість її ліквідації.

1. Використовуючи залежність (4.39) для кутової пожежі ( $180^\circ$ ,  $\alpha = 1,57$  рад) та значення лінійної швидкості її розповсюдження  $V_l = 1,32$  м/хв [135], визначаємо вплив тривалості вільного горіння на площу пожежі  $S_{II}$  (рис. 4.2).

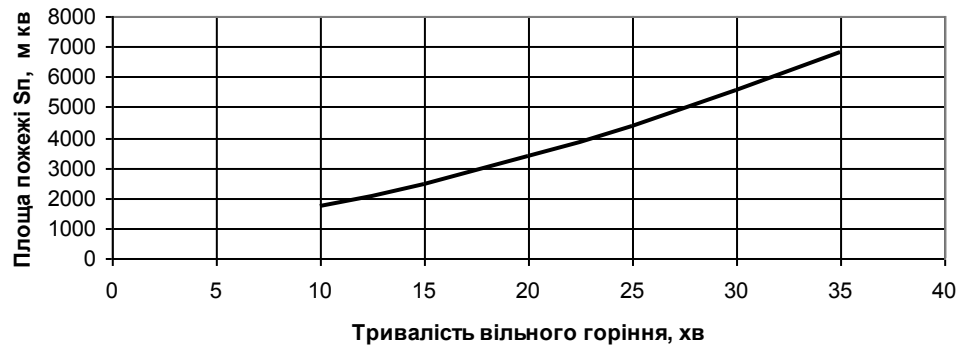


Рис. 4.2. Вплив тривалості вільного горіння  $\tau_{в.г}$  на площу пожежі  $S_{II}$

2. Визначаємо вплив тривалості вільного горіння  $\tau_{в.г}$  на площу локалізації з використанням залежності  $S_{лок} = \alpha h [10V_l + 2V_l(\tau_{в.г} - 10) - h]$ , де  $h$  – глибина подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі ( $h = 5$  м для ручних стволів [92]), м (рис. 4.3).

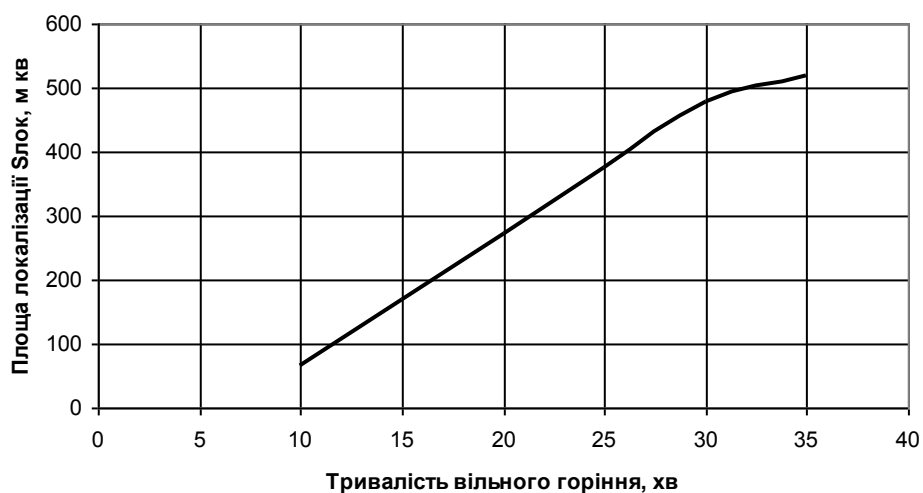


Рис. 4.3. Вплив тривалості вільного горіння  $\tau_{в.г}$  на площу локалізації  $S_{лок}$

3. Після визначення впливу  $\tau_{в.г}$  на  $S_{II}$  і  $S_{лок}$  встановлюємо вплив тривалості вільного горіння на співвідношення  $K = \frac{S_{II}}{S_{лок}}$  (рис. 4.4).

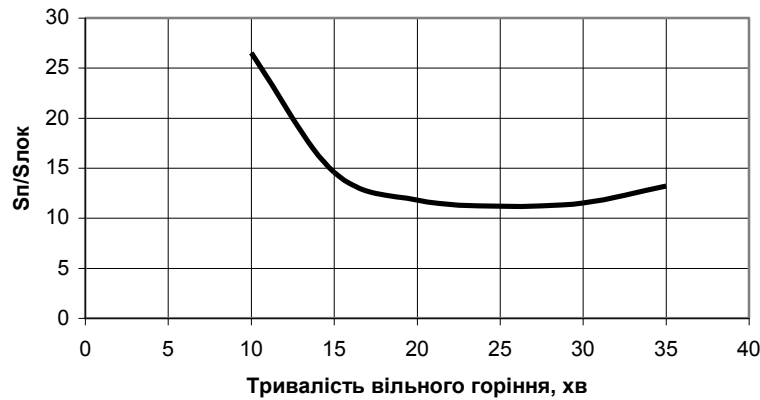


Рис. 4.4. Вплив тривалості вільного горіння  $\tau_{в.г}$  на співвідношення  $\frac{S_{II}}{S_{лок}}$

Отримана залежність є не лінійною і відповідає поліному четвертої степені

$$K = 0,0002\tau_{в.г}^4 - 0,0253\tau_{в.г}^3 + 0,9768\tau_{в.г}^2 - 16,75\tau_{в.г} + 119,18. \quad (4.56)$$

Визначаємо похідну по часу  $\tau_{в.г}$  від функції (4.56) та прирівнюємо її значення до нуля

$$\frac{dK}{d\tau_{в.г}} = 0,0008\tau_{в.г}^3 - 0,0759\tau_{в.г}^2 + 1,9536\tau_{в.г} - 16,75 = 0. \quad (4.57)$$

На підставі залежності (4.57) визначаємо оптимальне значення тривалості часу вільного горіння  $\tau_{в.г.опт}$  в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств. Для адекватності прийняття оптимального значення  $\tau_{в.г.опт}$  були виконані багаточисельні розрахунки для різних форм пожежі та різних значень лінійних швидкостей розповсюдження полум'я. Результати розрахунків показали, що оптимальне значення тривалості часу вільного горіння знаходиться в межах  $\tau_{в.г.опт} = 19 \dots 25$  хв, тобто в цих межах

співвідношення  $\frac{S_{II}}{S_{лок}}$  є найменшим. Це вказує на те, що площа локалізації по відношенню до площі пожежі буде найбільшою. Тому цей час можна прийняти для визначення площі пожежі та оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння.

На *восьмому* етапі переходимо до розроблення математичної моделі оптимізації кількості сил і засобів пожежогасіння в приміщеннях цехів деревообробних підприємств. Для цього випадку модель формується так:

функція мети

$$\tau_{л.і} \Rightarrow \min ; \quad (4.58)$$

за критерієм

$$B_{o.і} + B_{n.і} \Rightarrow B_{\min} ; \quad (4.59)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq N_{\bar{A}_i^3} \leq b_1 ; \quad (4.60)$$

$$a_2 \leq N_{\bar{A}_i^3}^C \leq b_2 ; \quad (4.61)$$

$$a_3 \leq N_{A_i} \leq b_3 ; \quad (4.62)$$

$$a_4 \leq \tau_{в.з.і} \leq b_4 ; \quad (4.63)$$

$$\tau_{лок.і} \leq \tau_{лок.оп} ; \quad (4.64)$$

$$p_i \geq [p], \quad (4.65)$$

де  $a_1, a_2, a_3$  – мінімальні значення обмежень, тобто існуюча наявність кількості спорядження та пожежної техніки, яка на період виникнення пожежі на об'єкті перебуває на чергуванні в найближчому до об'єкта депо пожежно-рятувальної частини;  $a_1 = 3$ ;  $a_2 = 1$ ;  $a_3 = 1$ ;  $a_4$  – мінімально прогнозоване значення часу вільного горіння, хв; значення  $a_4$  можна визначити за залежністю (4.57), тобто  $a_4 = 19$  хв;  $b_1, b_2, b_3$  – максимальні значення обмежень, які визначають на підставі розрахункових залежностей (4.7)...(4.9) і (4.42);  $b_4$  – максимальне значення часу вільного горіння;  $b_4 = 25$  хв;  $p$  – імовірність попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих

розв'язків;  $[p]$  – допустиме значення імовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення.

Для розв'язування оптимізаційної моделі скористуємося методом Монте-Карло [59, 158]. Область допустимих розв'язків, яка визначається обмеженнями (4.60)...(4.64), оточують  $m$ -мірним паралелепіпедом, в якому проводимо дослідження. Поставлену задачу розв'язуємо з використанням ПЕОМ. За допомогою давача комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$  в інтервалі  $0...1$ . Для перетворення псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$ , які рівномірно розподілені в інтервалі  $0...1$ , до значень  $N_{A_i}^A$ ,  $N_{A_i}^C$ ,  $N_{A_n}$  та  $\tau_{в.з.i}$  використовуємо залежності виду, наприклад, як для  $N_{A_n}$ :

$$N_{A_i} = a_3 + \mu_{3i}(b_3 - a_3), \quad (4.66)$$

де:  $\mu_{3i}$  – псевдовипадкове число для визначення чинника  $N_{A_i}$  на певному  $i$ -тому циклі розрахунку.

В процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначаються значення  $\tau_{л.i}$  за залежністю (4.51) та часткових критеріїв за залежностями (4.53) і (4.54), які перевіряються зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконуються до тих пір, поки буде виконана умова (4.65). Після завершення роботи програми на друк видаються такі дані:  $S_{II}$  на час початку локалізації,  $\tau_{сл}$ ,  $\tau_{лок}$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_л$ ,  $S_{лок}$ ,  $B_{\min}$ ,  $N_{A_i}^A$ ,  $N_{A_i}^C$ ,  $N_{A_n}$ ,  $N_в$ ,  $N_{н.а}$ ,  $N_{н.с}$ ,  $p$ .

Блок-схема алгоритму для розв'язування оптимізаційної моделі зображена на рис. 4.5...4.8.

Лістинги пакету прикладних програм для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння при ліквідації пожежі в приміщенні цеху, які написані на мові програмування C#, наведені у додатку 3. Роботу пакету прикладних програм продемонструємо на прикладі.

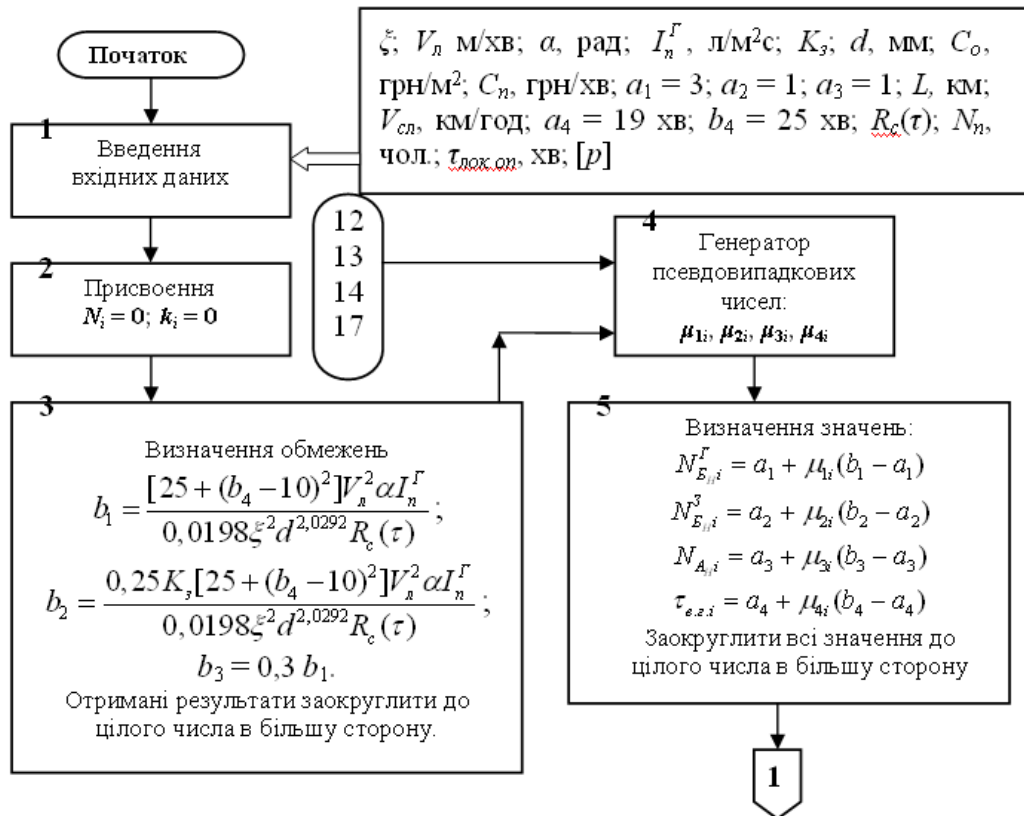


Рис. 4.5. Блок-схема алгоритму для введення вхідних даних, генерації псевдовипадкових чисел, визначення значень чинників обмежень (4.60)...(4.63)

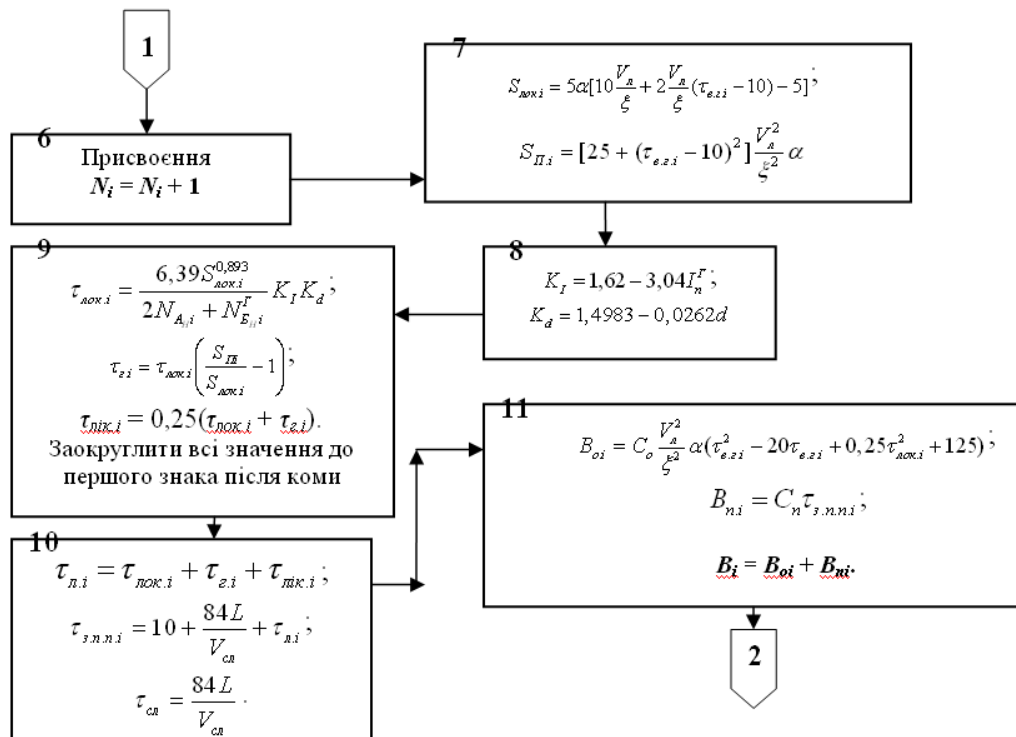


Рис. 4.6. Блок-схема алгоритму для визначення тривалості локалізації, гасіння та ліквідації пожежі і загальних втрат від пожежі

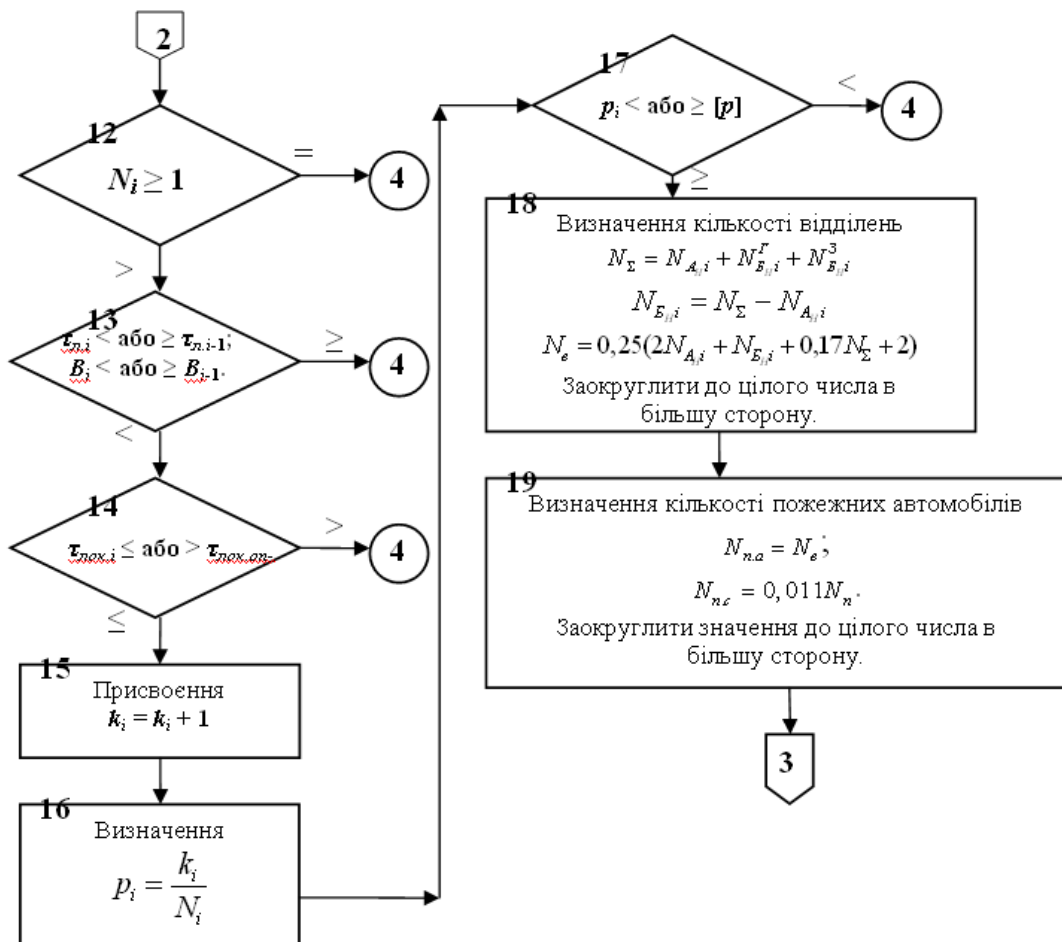


Рис. 4.7. Блок-схема алгоритму для визначення сил і засобів пожежогасіння

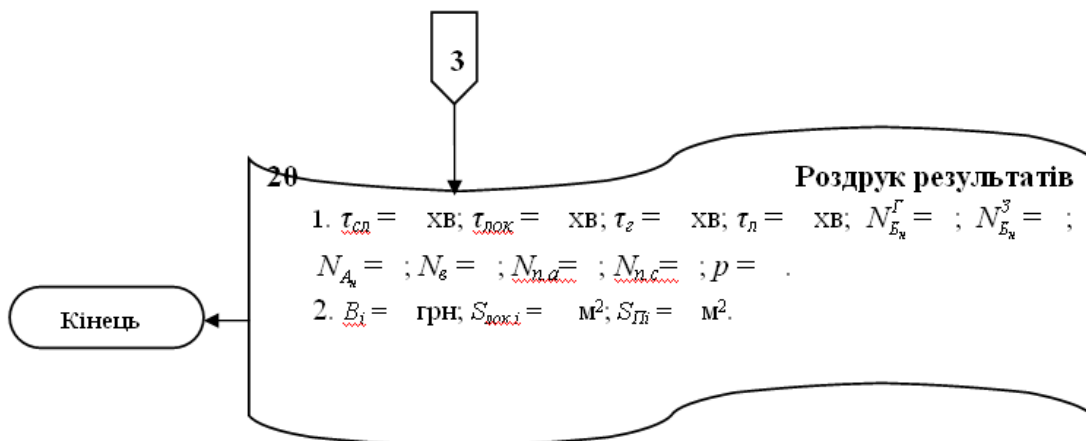


Рис. 4.8. Блок-схема алгоритму закінчення отримання визначених результатів та вказівка для їх роздруку

**Приклад.** Визначити оптимальну кількість сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі в приміщенні цеху деревообробного підприємства за вхідними даними:  $\zeta = 1$ ;  $V_n = 1,32$  м/хв;  $\alpha = 1,57$  рад;  $I_n^I = 0,2$  л/м<sup>2</sup>с;  $K_3 = 2$ ;  $d = 19$  мм;  $C_o$

$= 2500 \text{ грн/м}^2; C_n = 67 \text{ грн/хв}; a_1 = 3; a_2 = 1; a_3 = 1; L = 1,5 \text{ км}; V_{сл} = 32 \text{ км/ГОД}; a_4 = 19 \text{ хв}; b_4 = 25 \text{ хв}; R_c(\tau) = 0,8; N_n = 92 \text{ чол}; \tau_{лок.оп} = 40 \text{ хв}; [p] = 0,5.$

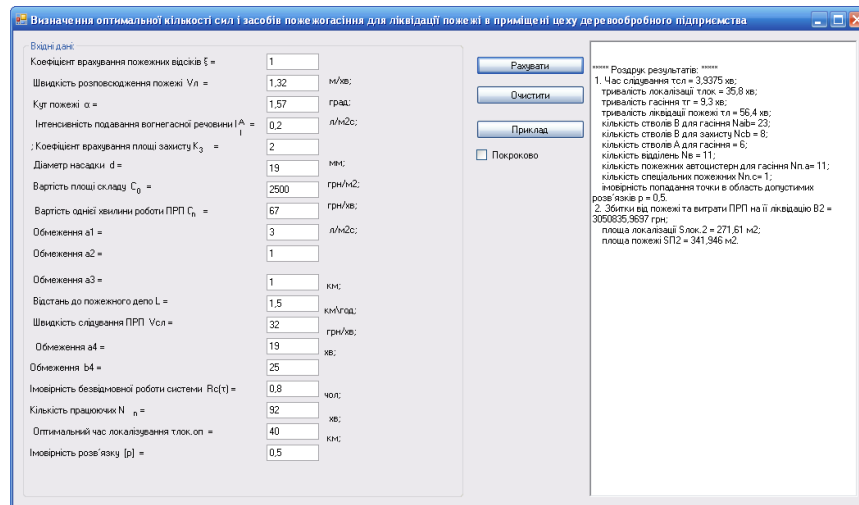


Рис. 4.9. Загальний вигляд робочого вікна програми для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогашіння в приміщенні цеху деревообробного підприємства

Після введення вхідних даних був отриманий результат (рис. 4.9):

Роздрук результатів:

1. Час слідування  $\tau_{сл} = 3,94 \text{ хв};$

тривалість локалізації  $\tau_{лок} = 36,8 \text{ хв};$

тривалість гасіння  $\tau_2 = 9,3 \text{ хв};$

тривалість ліквідації пожежі  $\tau_l = 56,4 \text{ хв};$

кількість стволів  $B$  для гасіння  $N_{A_f}^A = 23;$

кількість стволів  $B$  для захисту  $N_{A_f}^C = 8;$

кількість стволів  $A$  для гасіння  $N_{A_n} = 6;$

кількість відділень  $N_g = 11;$

кількість пожежних автоцистерн для гасіння  $N_{n.a} = 11;$

кількість спеціальних пожежних  $N_{n.c} = 1;$

імовірність попадання точки в область допустимих розв'язків  $p = 0,5.$

2. Збитки від пожежі та витрати ПРП на її ліквідацію  $B_2 = 3050835,97$

грн;

площа локалізації  $S_{лок.2} = 271,61 \text{ м}^2;$



площа пожежі  $S_{П2} = 341,95 \text{ м}^2$ .

#### **4.4.2. Оптимізація сил і засобів ліквідації пожежі на відкритих складах лісо і пиломатеріалів**

Питання по розробленню математичних моделей для оптимізації сил і засобів ліквідації пожеж на відкритих складах лісо і пиломатеріалів ще не розглядалися. При цьому були виконані роботи стосовно визначення часу гасіння пожежі в залежності від кількості одиниць відповідних приладів для її гасіння [200, 164].

Основною і найбільш поширеною речовиною, яка використовується для гасіння пожеж на лісоскладах, є вода. Використання води із змочувачами значно підвищує ефективність гасіння. В якості основних змочувачів як правило використовують різні піноутворювачі в кількості до 4%.

Найбільший ефект при локалізації та гасінні пожеж на лісоскладах досягається при застосуванні розчинів бентоніту і бішофіту, а також швидкотвердіючої піни (ШТП) [200]. Крім того, ШТП володіє тією властивістю, що вода, яка використовується для її приготування практично повністю залишається в зазначеному захисному шарі. Але ШТП рекомендується використовувати як засіб першої атаки з подальшим використанням води для кінцевого гасіння.

На лісоскладах необхідно створювати спеціальні протипожежні пункти, на яких необхідно зберігати вогнегасні речовини, основну і спеціальну пожежну техніку, запаси рукавів, пересувні лафетні вишки типів ПЛВ-6-17, ПЛВ-7-20 та пожежні всюдиходи (наприклад типів ПВ-120 або ВП-60). Крім цього, на лісоскладах рекомендується встановлювати стаціонарні гідромонітори. Наприклад, один гідромонітор типу ГМН-250С може гасити пожежу на території лісоскладу площею до 4,5 га. Для гасіння пожежі в мертвій зоні гідромонітору необхідно передбачати гребінки з головками для приєднання пожежних рукавів.

Гасіння пожежі на лісоскладах головним чином виконується лафетними стволами з пересувних вишок (діаметр насадки 50 мм, радіус дії 42 м, висота лафетного ствола над рівнем землі до 6 м), ручними стволами РС-70 і РС-50 зі звернутими насадками.

Перед тим як перейти до розгляду оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі на відкритих складах лісо і пиломатеріалів розглянемо особливості визначення площі пожежі  $S_{II}$ , площі локалізації пожежі  $S_{лок}$ , тривалості локалізації  $\tau_{лок}$  і кількості відділень  $N_g$ .

Площа пожежі  $S_{II}$  це площа, яка відповідає проекції зони горіння на горизонтальну площину. До площі пожежі включається також площа розривів між штабелями у тому випадку, коли ці розриви не перешкоджають горінню для даного виду пожежного навантаження. Виходячи з цього положення спочатку визначаємо площу пожежі  $S_{II}$ , а потім кількість штабелів  $n$ , яка охоплена пожежею за час  $\tau_{г.г}$  вільного горіння

$$S_{II} = [25 + (\tau_{г.г} - 10)^2] V_{IIг}^2 \alpha; \quad (4.67)$$

$$n = \frac{[25 + (\tau_{г.г} - 10)^2] V_{IIг}^2 \alpha}{(b + b_n)(l + b_{non})}, \quad (4.68)$$

де значення  $n$  заокруглити до цілого числа в більшу сторону;

$V_{IIг}$  – найбільш вірогідна швидкість розповсюдження полум'я по штабелю з урахуванням швидкості вітру, м/хв;

$$V_{IIг} = V_l K_g K_\alpha; \quad (4.69)$$

$K_g$  – коефіцієнт, який враховує вплив швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я по штабелю

$$K_g = 0,9912 \exp(0,0388V_g); \quad (4.70)$$

$V_g$  – швидкість вітру, м/с;

$K_\alpha$  – коефіцієнт, який враховує вплив напрямку дії вектора швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я по штабелю

$$K_\alpha = -5 \cdot 10^{-5} \alpha_g^2 + 0,0123 \alpha_g + 0,374 ; \quad (4.71)$$

$\alpha_g$  – кут напрямку вітру (при  $\alpha_g = 90^\circ$  розглядається попутний напрям вітру, який співпадає з повздовжнім або поперечним розміщенням штабелів кварталу і переміщує пожежу на квартал; при  $\alpha_g = 270^\circ$  – зустрічний напрям вітру; крім цього, при виникненні пожежі по периметру квартала попутний напрям вітру необхідно розглядати з тієї з чотирьох сторін кварталу, на якій виникла пожежа; при виникненні пожежі в центрі кварталу необхідно розглядати тільки попутний напрям вітру), град;

$b$  – ширина штабеля, м;

$l$  – довжина штабеля, м;

$b_n$  – ширина повздовжніх проїздів між штабелями, м;

$b_{non}$  – ширина поперечних проїздів між штабелями, м.

Під площею локалізації  $S_{лок}$  розуміють площу поверхонь штабелів, на яку подають вогнегасну речовину. Площу локалізації можна визначити за залежністю

$$S_{лок} = l_\phi (h + h_{лок}), \quad (4.67)$$

де  $l_\phi$  – довжина (периметр) фронту пожежі, м;

$$l_\phi = 2(b + l + b_n + b_{non})n; \quad (4.68)$$

$h$  – висота штабеля, м;

$h_{лок}$  – глибина подачі вогнегасної речовини, м ( $h_{лок} = 5$  м).

Тоді в кінцевому варіанті площа локалізації буде

$$S_{лок} = 2(b+l+b_n+b_{non})(h+5)n. \quad (4.69)$$

Час тривалості локалізації визначаємо з використанням залежності (4.6)

$$\tau_{\ddot{e}i\dot{e}} = \frac{6,39[2(b+l+b_n+b_{non})(h+5)\dot{i}]^{0,893}}{17,6N_{A_i} \cdot N_{\ddot{E}_i} + N_{\dot{A}_i}} K_l K_d, \quad (4.70)$$

де  $N_{ЛH}$  – загальна кількість лафетних стволів.

Кількість відділень визначаємо з урахуванням залежності (4.10) і з використанням додатково лафетних стволів

$$N_{\hat{a}} = 0,25(2N_{\ddot{E}_i} + 2N_{A_i} + N_{\dot{A}_i} + 0,17N_{\Sigma} + 2), \quad (4.71)$$

де  $N_{\Sigma}$  – загальна кількість стволів

$$N_{\Sigma} = N_{\ddot{E}_i} + N_{A_i} + N_{\dot{A}_i} + N_{\dot{A}_i}^C. \quad (4.72)$$

З урахуванням наведених визначень переходимо до розроблення математичної моделі оптимізації кількості сил і засобів пожежогасіння на відкритих складах лісо і пиломатеріалів деревообробних підприємств. Для цього випадку модель формується так:

функція мети

$$\tau_{n,i} \Rightarrow \min; \quad (4.73)$$

за критерієм

$$B_{o,i} + B_{n,i} \Rightarrow B_{\min}; \quad (4.74)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq N_{\dot{A}_i}^{\dot{A}} \leq b_1; \quad (4.75)$$

$$a_2 \leq N_{\dot{A}_i}^C \leq b_2; \quad (4.76)$$

$$a_3 \leq N_{A_{Hi}} \leq b_3; \quad (4.77)$$

$$a_4 \leq N_{ЛHi} \leq b_4; \quad (4.78)$$

$$a_5 \leq \tau_{в.з.i} \leq b_5; \quad (4.79)$$

$$\tau_{лок.i} \leq \tau_{лок.оп}; \quad (4.80)$$

$$p_i \geq [p], \quad (4.81)$$

де  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – мінімальні значення обмежень, тобто існуюча наявність кількості спорядження та пожежної техніки, яка на період виникнення пожежі знаходиться на об'єкті або перебуває на чергуванні в найближчому до об'єкта депо пожежно-рятувальної частини;  $a_1 = 3; a_2 = 1; a_3 = 1; a_4 = 2; a_5$  – мінімально прогнозоване значення часу вільного горіння, хв; значення  $a_5$  можна визначити за залежністю (4.57), тобто  $a_5 = 19$  хв;

$b_1, b_2, b_3$  – максимальні значення обмежень, які визначають на підставі розрахункових залежностей (4.7)...(4.9) і (4.42);

$b_4$  – максимальне значення обмеження, яке визначають за залежністю

$$b_4 = N_{лн} = \frac{S_{лн} I_n^r}{Q_B R_c(\tau)}; \quad (4.82)$$

$N_{лн}$  - максимальна кількість лафетних стволів для ліквідації пожежі;

$I_n^r = 0,45$  л/м<sup>2</sup>с (на штабелі пиломатеріалів);  $I_n^r = 0,35$  л/м<sup>2</sup>с (на штабелі круглих лісоматеріалів);

$Q_B = 65$  л/с;

$b_5$  – максимальне значення часу вільного горіння;  $b_5 = 25$  хв;

$p$  – імовірність попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків;

$[p]$  – допустиме значення імовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення.

Крім цього, необхідно уточнити залежність (4. 49) для визначення тривалості гасіння пожежі на відкритих складах лісоматеріалів. Це пов'язано з тим, що площа локалізації  $S_{лок}$  при гасінні пожеж на відкритих складах лісоматеріалів значно більша площі пожежі  $S_{лн}$ . Тому в цьому випадку

$$\tau_2 = \tau_{лок} \frac{S_{II}}{S_{лок}}. \quad (4.83)$$

Блок-схема алгоритму для розв'язування оптимізаційної моделі з використанням методу Монте-Карло зображена на рис. 4.10...4.13. Лістинги пакету прикладних програм для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння наведені у додатку 4. Роботу пакету прикладних програм продемонструємо на прикладі.

**Приклад.** Визначити оптимальну кількість сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі на відкритому складі круглих лісоматеріалів деревообробного підприємства за вхідними даними:  $V_l = 3,51$  м/хв;  $V_e = 4$  м/с;  $\alpha_e = 45$  град;  $b = 6$  м;  $l = 6,5$  м;  $h = 6$  м;  $b_n = 16$  м;  $b_{non} = 6$  м;  $\alpha = 1,57$  рад;  $I_n^f = 0,35$  л/м<sup>2</sup>с;  $K_3 = 2$ ;  $d = 32$  мм;  $C_o = 1440$  грн/м<sup>2</sup> [190, 197];  $C_n = 67$  грн/хв;  $a_1 = 2$ ;  $a_2 = 1$ ;  $a_3 = 1$ ;  $a_4 = 1$ ;  $L = 1,5$  км;

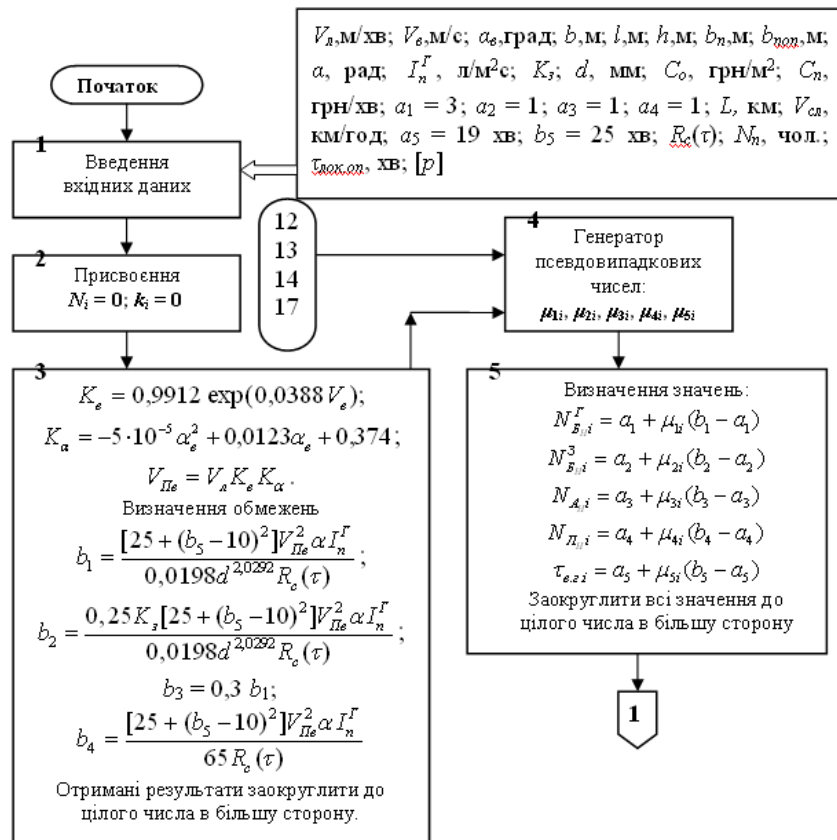


Рис. 4.10. Блок-схема алгоритму для введення вхідних даних, генерації псевдовипадкових чисел, визначення значень чинників обмежень (4.75)...(4.79)

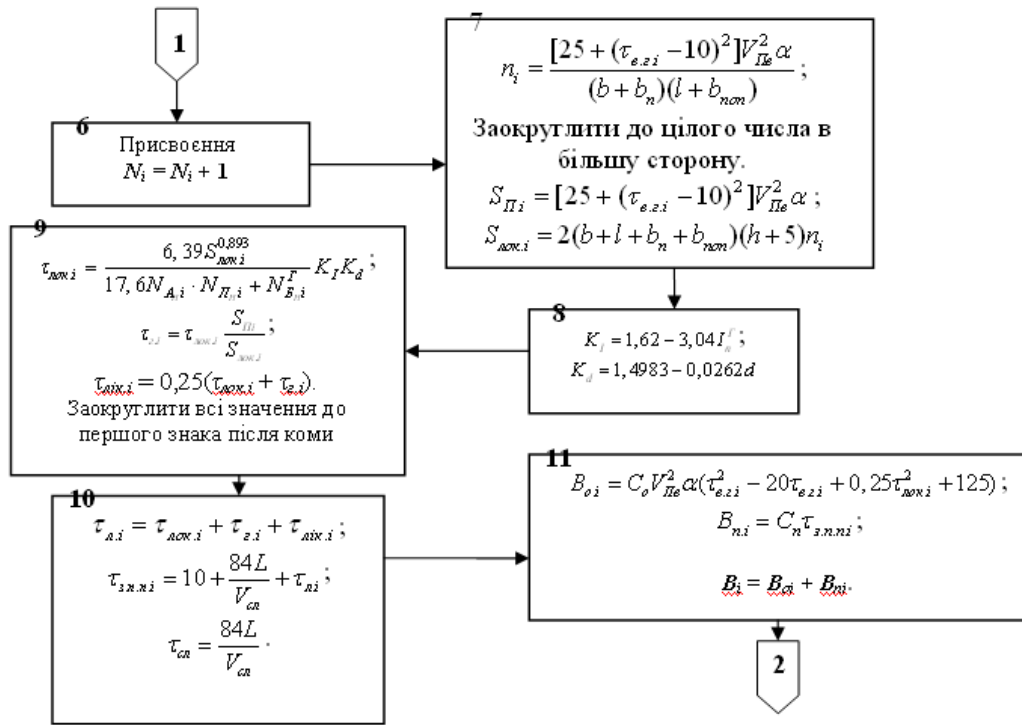


Рис. 4.11. Блок-схема алгоритму для визначення тривалості локалізації, гасіння та ліквідації пожежі і загальних втрат від пожежі

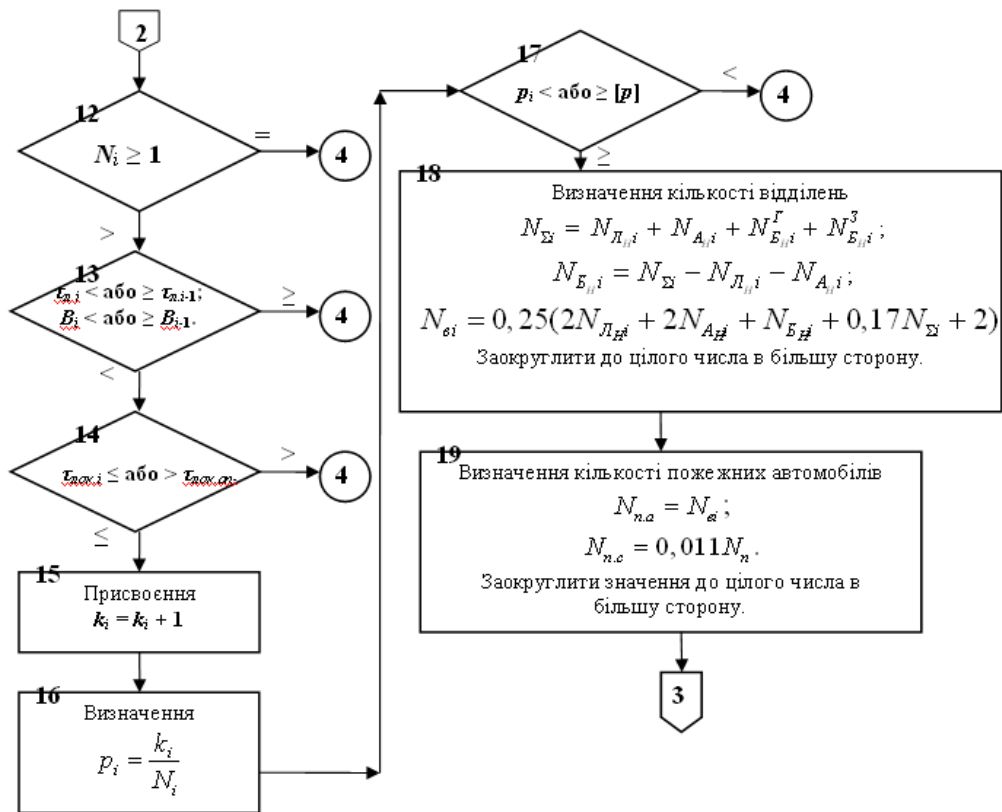


Рис. 4.12. Блок-схема алгоритму для визначення сил і засобів пожежогасіння

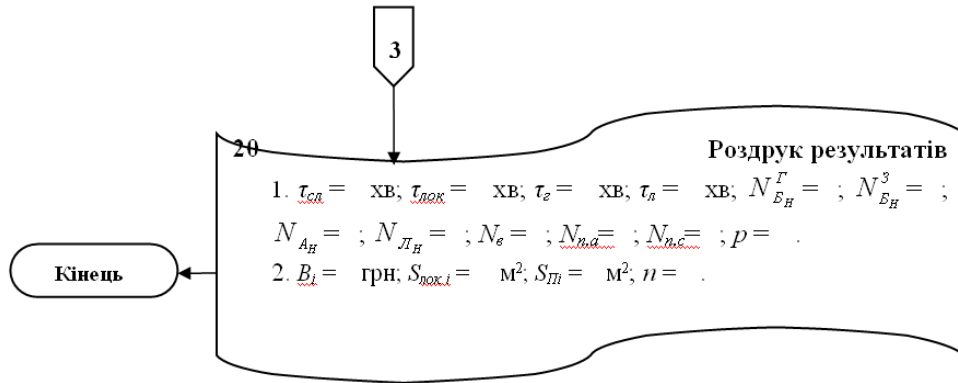


Рис. 4.13. Блок-схема алгоритму закінчення отримання визначених результатів та вказівка для їх роздруку

$V_{сл} = 32 \text{ км/год}; a_5 = 19 \text{ хв}; b_5 = 25 \text{ хв}; R_c(\tau) = 0,8; N_n = 16 \text{ чол}; \tau_{лок.оп} = 24 \text{ хв}; [p] = 0,5.$

Після введення вхідних даних був отриманий результат (рис. 4.9):

Вхідні дані:		Результати:	
Швидкість розповсюдження пожежі $Vл =$	3,51 м/хв;	***** Результати *****	
Швидкість вітру $Vв =$	4 м/с;	1. Час слідування $\tau_{сл} = 3,94 \text{ хв};$	
Кут напрямку вітру $\alpha =$	45 град;	тривалість локалізації тлох = 8,669 хв;	
Ширина штабеля $b =$	6 м;	тривалість гасіння тг 3,057 хв;	
Довжина штабеля $l =$	6,5 м;	тривалість ліквідації пожежі $\tau_l = 14,63 \text{ хв};$	
Висота штабеля $h =$	6 м;	кількість стволів В для гасіння = 12	
Ширина позадвожнього проїзду складу $bp =$	16 м;	кількість стволів В для захисту = 8	
Ширина поперечного проїзду складу $bpop =$	6 м;	кількість стволів А для гасіння = 7	
Кут пожежі $\alpha =$	1,57 рад;	кількість лафетних стволів для гасіння = 8	
Інтенсивність подавання вогнегасної речовини $I_A =$	0,35 л/м2с;	кількість відділень $Nв = 15$	
Коефіцієнт врахування площі захисту $Kз =$	2	кількість пожежних автцистерн для гасіння $Nп.а = 15$	
Діаметр насадки $d =$	32 мм;	кількість спеціальних пожежних $Nп.с = 1$	
Вартість площі складу $C_0 =$	1440 грн/м2;	імовірність попадання точки в область допустимих розв'язків $p = 0,5$	
Вартість однієї хвилини роботи ПРП $C_n =$	67 грн/хв;	1.2. Збитки від пожежі та витрати ПРП на її ліквідацію $B2 = 5497860$	
Обмеження $a1 =$	2	грн;	
Обмеження $a2 =$	1	площа локалізації $S_{лок.2} = 9867\text{м}^2;$	
Обмеження $a3 =$	1	площа пожежі $S_{П2} = 3479,64\text{м}^2;$	
Обмеження $a4 =$	1	кількість штабелів, які охоплені пожежею $n2 = 13\text{м}^2;$	
Відстань до пожежного депо $L =$	1,5 км;		
Швидкість слідування ПРП $V_{сл} =$	32 км/год;		
Обмеження $a5 =$	19		
Обмеження $b5 =$	25		
Імовірність безвідмовної роботи системи $R_c(\tau) =$	0,8		
Кількість працюючих $N =$	16 чол;		
Оптимальний час локалізування тлох.оп =	16 хв;		
Імовірність розв'язку $[p] =$	0,5		

Рис. 4.9. Загальний вигляд робочого вікна програми для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння на відкритих складах лісо і пиломатеріалів деревообробного підприємства

Роздрук результатів:

1. Час слідування  $\tau_{сл} = 3,94 \text{ хв};$

тривалість локалізації  $\tau_{лок} = 8,67 \text{ хв};$



тривалість гасіння  $\tau_2 = 3,06$  хв;

тривалість ліквідації пожежі  $\tau_l = 14,63$  хв;

кількість стволів  $B$  для гасіння  $N_{A_f}^A = 12$ ;

кількість стволів  $B$  для захисту  $N_{A_f}^C = 8$ ;

кількість стволів  $A$  для гасіння  $N_{A_H} = 7$ ;

кількість лафетних стволів для гасіння  $N_{L_H} = 8$ ;

кількість відділень  $N_6 = 15$ ;

кількість пожежних автоцистерн для гасіння  $N_{n.a} = 15$ ;

кількість спеціальних пожежних  $N_{n.c} = 1$ ;

імовірність попадання точки в область допустимих розв'язків  $p = 0,5$ .

2. Збитки від пожежі та витрати ПРП на її ліквідацію  $B_2 = 5497860$  грн;

площа локалізації  $S_{лок.2} = 9867$  м<sup>2</sup>;

площа пожежі  $S_{П2} = 3479,64$  м<sup>2</sup>;

кількість штабелів, які охоплені пожежею  $n_2 = 13$ .

#### **4.5. Дослідження сил і засобів ліквідації пожежі у функціональній залежності від основних чинників пожежі та надійності системи пожежогасіння**

##### **4.5.1. Дослідження при ліквідації пожежі в приміщені будівлі цеху**

Дослідження процесу ліквідації пожежі виконуємо з використанням програми для визначення сил і засобів для ліквідації пожежі в приміщені цеху та за даними прикладу, наведеного в параграфі 4.4.1, для якого приймаємо головні змінні чинники цього процесу, які впливають на площу пожежі і локалізацію та на кількість приладів пожежогасіння і залучених відділень ПРП, а саме: відсутність або наявність в приміщені цеху пожежних відсіків, яка враховується коефіцієнтом  $\xi$ ; лінійна швидкість розповсюдження фронту пожежі  $V_l$ ; тип пожежі (кругова, кутова), яка характеризується

коефіцієнтом  $\alpha$ ; імовірність безвідмовної роботи системи пожежогасіння  $R_c(\tau)$ .

1. Вплив пожежних відсіків на площу пожежі та площу локалізації:  
при відсутності пожежних відсіків  $\xi = 1$ ; при наявності –  $\xi = 1,8$ .

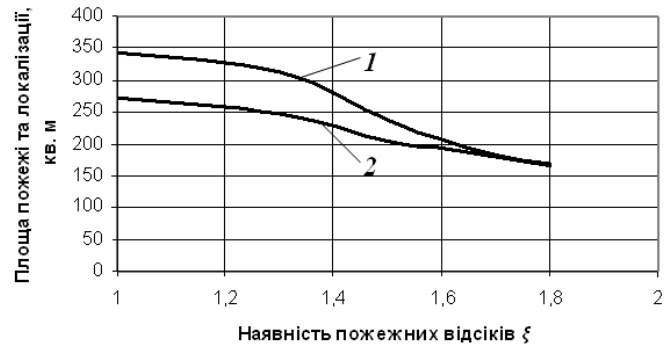


Рис. 4.10. Вплив наявності пожежних відсіків на величину площі пожежі та площі локалізації: **1** – площа пожежі  $S_{II}$ ; **2** – площа локалізації

Аналіз результатів досліджень (рис. 4.10) з використанням віртуальної системи для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння в цеху деревообробного підприємства показує, що при наявності пожежних відсіків лінійна швидкість розповсюдження фронту пожежі зменшується і це зменшує площу пожежі і локалізації.

Наприклад, при відсутності пожежних відсіків площа пожежі складала  $S_{II} = 341,95 \text{ м}^2$ , площа локалізації  $S_{лок} = 271,61 \text{ м}^2$ , при наявності пожежних відсіків ці площі зменшились відповідно в 2 і 1,6 рази. Крім цього, тривалість ліквідації пожежі зменшилась з  $\tau_l = 56,4 \text{ хв}$  до  $\tau_l = 26,4 \text{ хв}$ , що підтверджується аналітичними розрахунками.

2. Вплив лінійної швидкості розповсюдження фронту пожежі  $V_l$  на площу пожежі і площу локалізації (рис. 4.11).

Лінійна швидкість розповсюдження фронту пожежі  $V_l$  в першу чергу залежить від виду і кількості пожежного навантаження. Так при зміні  $V_l$  від 0,8 м/хв до 1,5 м/хв, тобто в 1,9 рази, площа пожежі збільшується в 2,2 рази, а площа локалізації – в 1,7 рази.

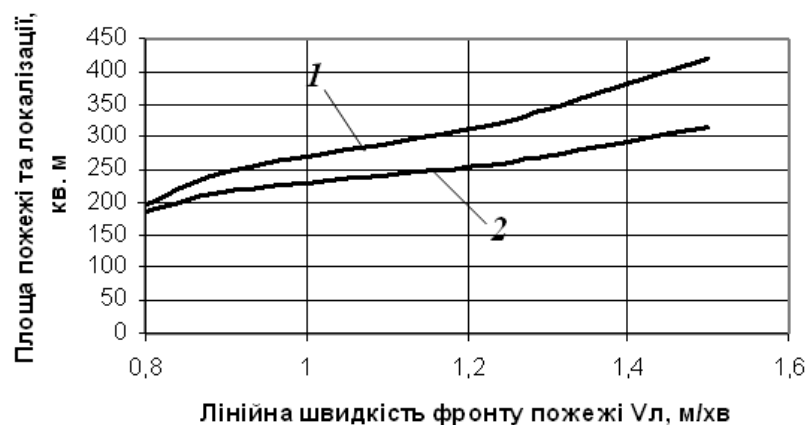


Рис. 4.11. Вплив лінійної швидкості розповсюдження фронту пожежі  $V_l$  на:  
**1** – площу пожежі; **2** – площу локалізації

Виходячи з цього висновку можна зауважити, що для зменшення площі пожежі і локалізації в першу чергу необхідно в деревообробних цехах влаштовувати протипожежні відсіки, які значно зменшують лінійну швидкість розповсюдження фронту пожежі.

### 3. Вплив типу пожежі (кругова, кутова) на площу пожежі і локалізацію.

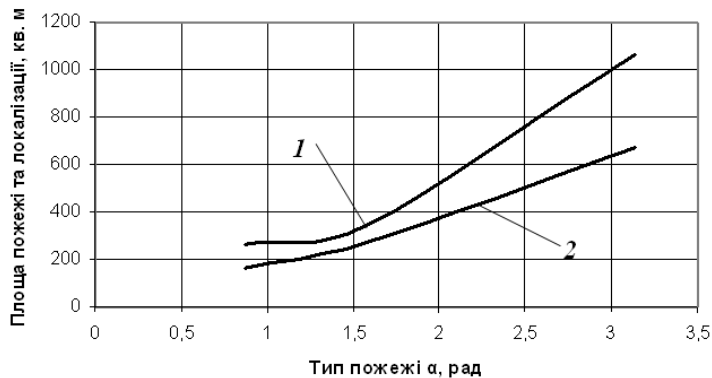


Рис. 4.12. Вплив типу пожежі на: **1** – площу пожежі; **2** – площу локалізації

На виникнення того чи іншого типу пожежі (кругова  $360^\circ$  або кутова  $180^\circ$  чи  $90^\circ$ ) впливає місце її виникнення. Причиною виникнення пожежі в деревообробних цехах можуть бути: підвищена температура різальних інструментів при обробленні деревини на верстатах; спалах лакофарбових покриттів при їх нанесенні на поверхню виробу при підвищенні температури навколишнього середовища до температури спалаху; перегрів електромережі від її перевантаження; коротке замикання електричної системи тощо.

Найбільша площа пожежі виникає при її круговому типу (рис. 4.12). Площа кругової пожежі приблизно у 4 рази більша за площу кутової (90°). Тому необхідно в першу чергу виконувати протипожежну безпеку особливо в центральній частині цеху, де може виникнути кругова пожежа.

4. Вплив імовірності безвідмовної роботи системи  $R_c(\tau)$  пожежогасіння на кількість пожежно-рятувальних відділень та приладів для гасіння пожежі.

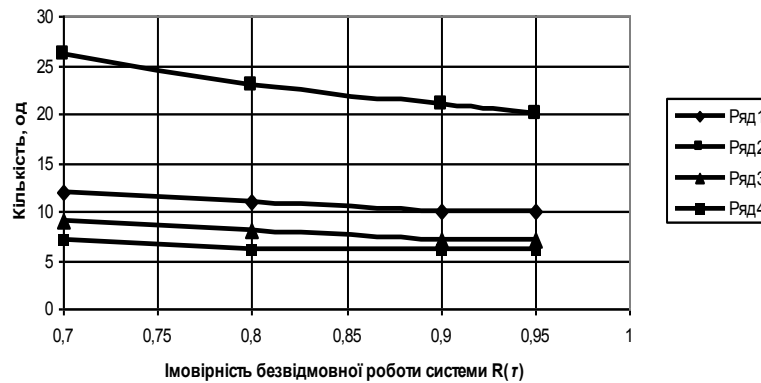


Рис. 4.13. Вплив надійності системи пожежогасіння на кількість пожежно-рятувальних відділень та приладів для гасіння пожежі: ряд 1 – пожежно-рятувальні відділення; ряд 2 – ручні стволи В для гасіння; ряд 3 – ручні стволи В для захисту; ряд 4 – ручні стволи А для гасіння

Результати аналізу впливу імовірності безвідмовної роботи на кількість пожежно-рятувальних відділень та приладів для гасіння пожежі показали, що при зміні імовірності безвідмовної роботи всієї системи пожежогасіння з 0,7 до 0,95 кількість відділень зменшується в 1,2 рази, а кількість стволів В на гасіння пожежі – в 1,3 рази. Відповідно зменшується кількість стволів А на гасіння і стволів В на захист. Тобто можна зробити висновок, що імовірність безвідмовної роботи всієї системи пожежогасіння в значній степені впливає на загальну кількість залучення сил і засобів для ліквідації пожежі і цей чинник необхідно враховувати для кожного випадку ліквідації пожежі.

#### 4.5.2. Дослідження при ліквідації пожежі на відкритих складах

Дослідження процесу ліквідації пожежі на відкритих складах лісо і

пилотеріалів виконуємо з використанням програми для визначення сил і засобів ліквідації пожежі на відкритих лісоскладах та за даними прикладу, наведеного в параграфі 4.4.2, для якого приймаємо головні змінні чинники цього процесу, які впливають на площу пожежі і локалізації та на кількість приладів пожежогасіння і залучених відділень ПРП, а саме: лінійна швидкість розповсюдження фронту пожежі  $V_l$ ; швидкість вітру  $V_в$ ; напрям вітру (кут напрямку вітру  $\alpha_в$ ); тип пожежі (кругова, кутова), яка характеризується коефіцієнтом  $\alpha$ ; імовірність безвідмовної роботи системи пожежогасіння  $R_c(\tau)$ .

1. Вплив лінійної швидкості розповсюдження фронту пожежі  $V_l$  на площу локалізації  $S_{лок}$  і площу пожежі  $S_{П}$ .

Аналіз впливу лінійної швидкості розповсюдження фронту пожежі  $V_l$  на площу локалізації  $S_{лок}$  і площу пожежі  $S_{П}$  з використанням програми для визначення сил і засобів ліквідації пожежі на відкритих лісоскладах (рис. 4.14) показав, що при збільшенні  $V_l$  площа локалізації  $S_{лок}$  і площа пожежі  $S_{П}$  збільшуються.



Рис. 4.14. Вплив лінійної швидкості фронту пожежі при попутньобоковому вітру  $V_в = 4$  м/с на: площу локалізації – ряд 1; площу пожежі – ряд 2

Отриманий результат підтверджується результатами теоретичних і експериментальних досліджень. Крім цього, підтверджено той факт, що в процесі ліквідації пожежі на складах штабельного зберігання лісоматеріалів площа локалізації більша за площу пожежі приблизно в 3,4 рази. 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.

Результати аналізу пожежі на лісоскладі показали, що при збільшенні лінійної швидкості фронту пожежі в 4 рази кількість штабелів, які охоплені пожежею, збільшується в 5...6 разів (рис. 4.15).



Рис. 4.15. Вплив лінійної швидкості фронту пожежі при попутньобоковому вітру  $V_в = 4$  м/с на кількість штабелів охоплених пожежею

У зв'язку з цим висновком необхідно при розміщенні відкритих складів лісоматеріалів враховувати троянду вітрів, щоб переважний вітер був спрямований не на склад, а зі складу. Це дозволить значно зменшувати лінійну швидкість фронту пожежі.

2. Вплив швидкості вітру  $V_в$  на площу локалізації  $S_{лок}$  і площу пожежі  $S_{п}$ .

Аналізуючи результати віртуальної системи для визначення сил і засобів ліквідації пожежі на відкритих лісоскладах було встановлено, що зі збільшенням бокового попутного вітру ( $\alpha_в = 45^\circ$ ) у 4 рази (рис. 4.16) площа локалізації за той же час збільшується приблизно в 2,1 рази, а площа пожежі – в 2,15 рази. Такі результати можна пояснити за рахунок збільшення лінійної швидкості фронту пожежі.

Зі збільшенням площі пожежі збільшується кількість штабелів, яка охоплюється пожежею. Наприклад, при збільшенні швидкості вітру в 4 рази

площа пожежі збільшується в 2,15 рази, а кількість штабелів (рис. 4.17), що знаходиться в зоні пожежі збільшується, приблизно в 2 рази.

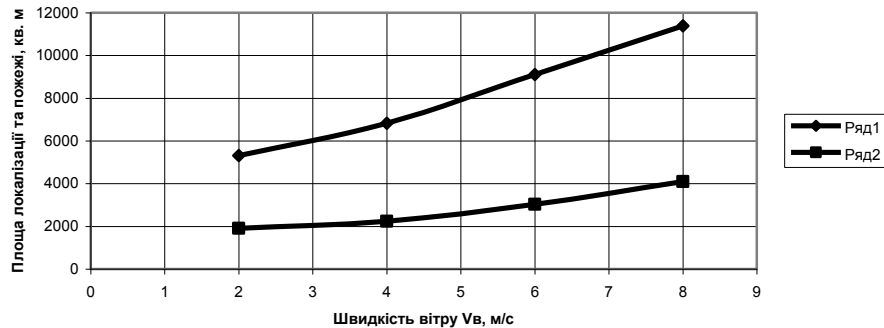


Рис. 4.16. Вплив швидкості вітру на площу локалізації (ряд 1) і площу пожежі (ряд 2)



Рис. 4.17. Вплив швидкості вітру на кількість штабелів охоплених пожежею

3. Вплив напрямку вітру  $\alpha_g$  на площу локалізації  $S_{лок}$ , площу пожежі  $S_{п}$  та на кількість штабелів, яка охоплена пожежею.

Для аналізу були розглянуті такі напрямки вітру:  $\alpha_g = 45^\circ$  (боковий попутний вітер);  $\alpha_g = 90^\circ$  (попутний вітер);  $\alpha_g = 270^\circ$  (зустрічний вітер). Дослідження виконувалися при  $V_{л} = 3,51$  м/хв і  $V_g = 4$  м/с. Результати досліджень зображені на рис. 4.18 і рис. 4.19.

Аналіз отриманих результатів дослідження показує, що найбільша площа локалізації і пожежі відповідає попутному напрямку вітру ( $\alpha_g = 90^\circ$ ) (рис. 4.18), а найменші площі відповідають зустрічному напрямку вітру.

Наприклад, площа локалізації при зустрічному напрямі вітру у порівнянні з попутнім зменшується в майже у 25 разів, а площа пожежі – у 170 разів.

Зменшення площі пожежі від зустрічного напрямку вітру призводить до зменшення кількості штабелів охоплених пожежею. Так при заданих умовах пожежі при попутному напрямку вітру пожежею буде охоплено 25 штабелів (рис. 4.19), а при зустрічному – тільки 1.

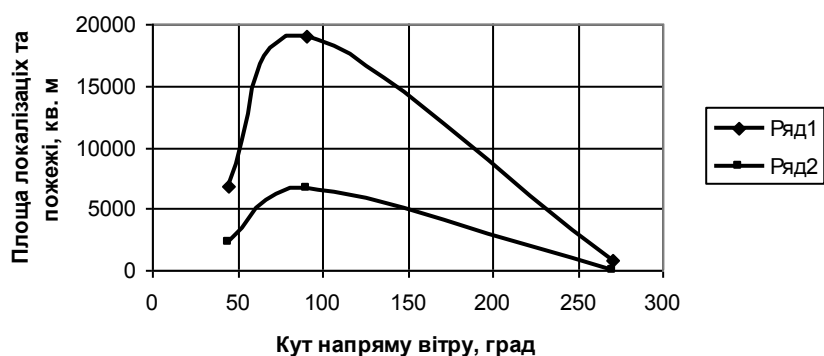


Рис. 4.18. Вплив напрямку вітру на площу локалізації (ряд 1) і площу пожежі (ряд 2)

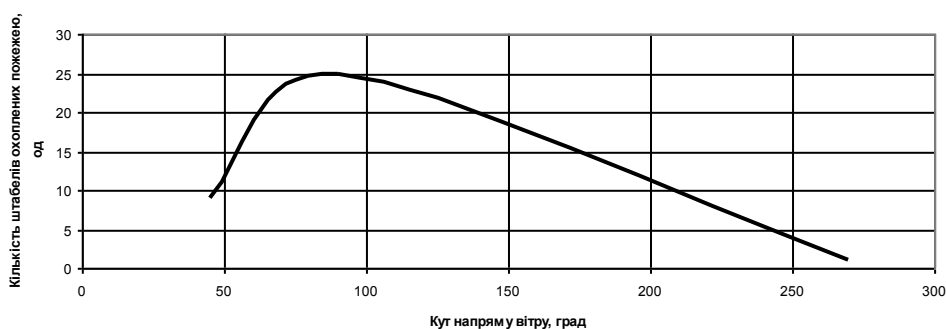


Рис. 4.19. Вплив напрямку вітру на кількість штабелів охоплених пожежею

4. Вплив типу пожежі та надійності системи пожежогасіння на площу локалізації і пожежі та на визначення кількості сил і засобів для ліквідації пожежі вже розглянуто з використанням програми для визначення сил і засобів для ліквідації пожежі в закритому приміщенні цеху. Аналіз отриманих



результатів для відкритих лісоскладів показав, що результати цих досліджень аналогічні деревообробним цехам.

### 4.5.3. Аналіз отриманих результатів

Для аналізу отриманих результатів досліджень скористуємося результатами ліквідації пожежі на деревообробному підприємстві «Клен» [183], яка сталася 5 травня 2015 року в с. Осій Іршавського району Закарпатської області. Повідомлення про пожежу до ОДС надійшло о 15 год 24 хв. На місце пожежі прибуло 5 відділень ПРЧ з м. Іршави і м. Виноградів, тобто загалом від Управління ДСНС України у Закарпатській області було залучено 5 пожежних автоцистерн. Пожежу було локалізовано о 16 год 30 хв, а ліквідовано о 19 год 30 хв. Тривалість вільного горіння склала 36 хв. Тривалість локалізації – 30 хв, тривалість гасіння – 120 хв, а тривалість кінцевого гасіння – 60 хв. Пожежа кутова (90°) виникла на сортувальній та брикетувальній ділянці в цеху, розміри якого 36x72 м. Загальний вид цеху в період ліквідації пожежі зображено на рис. 4.20.



Рис. 4.20. Загальний вид цеху деревообробного підприємства «Клен» в період ліквідації пожежі

Фрагмент ліквідації пожежі в цеху деревообробного підприємства «Клен» зображено на рис. 4.21. Внаслідок пожежі підприємство отримало збитки від знищення покрівлі цеху по всій площі, вигорання внутрішнього

середовища дільниці і цеху (верстати, майно, документація) та 220 м<sup>3</sup> деревини.



Рис. 4.21. Фрагмент ліквідації пожежі на деревообробному підприємстві «Клен»

Аналіз результатів ліквідації пожежі на деревообробному підприємстві «Клен» виконуємо з використанням віртуальної системи (програми) для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі в приміщенні цеху деревообробного підприємства.

**На першому** етапі для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі в приміщенні цеху деревообробного підприємства «Клен» вводимо в систему такі вхідні дані:  $\zeta = 1$ ;  $V_n = 1,2$  м/хв;  $\alpha = 0,875$  рад;  $I_n^r = 0,2$  л/м<sup>2</sup>с;  $K_3 = 2$ ;  $d = 19$  мм;  $C_o = 1800$  грн/м<sup>2</sup>;  $C_n = 67$  грн/хв;  $a_1 = 3$ ;  $a_2 = 1$ ;  $a_3 = 1$ ;  $L = 22$  км;  $V_{cl} = 90$  км/год;  $a_4 = 30$  хв;  $b_4 = 40$  хв;  $R_c(\tau) = 0,9$ ;  $N_n = 41$  чол;  $\tau_{лок.оп} = 40$  хв;  $[p] = 0,9$ .

Після розрахунку віртуальною системою для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння отримуємо наступний результат.

Роздрук результатів:

1. Час слідування  $\tau_{cl} = 20,5$  хв;  
тривалість локалізації  $\tau_{лок} = 19,5$  хв;  
тривалість гасіння  $\tau_2 = 26,1$  хв;  
тривалість ліквідації пожежі  $\tau_n = 57$  хв;  
кількість стволів  $B$  для гасіння  $N_{B_n}^r = 33$ ;  
кількість стволів  $B$  для захисту  $N_{B_n}^3 = 11$ ;

кількість стволів  $A$  для гасіння  $N_{A_n} = 10$ ;

кількість відділень  $N_g = 16$ ;

кількість пожежних автоцистерн для гасіння  $N_{n.a} = 16$ ;

кількість спеціальних пожежних  $N_{n.c} = 1$ ;

імовірність попадання точки в область допустимих розв'язків  $p = 0,9$ .

2. Збитки від пожежі та витрати ПРП на її ліквідацію  $B = 1147469,82$  грн;

площа локалізації  $S_{лок.2} = 225,3 \text{ м}^2$ ;

площа пожежі  $S_{П2} = 526,8 \text{ м}^2$ .

**На другому** етапі аналізуємо результати ліквідації пожежі:

1. На деревообробному підприємстві «Клен» в цеху, в якому виникла пожежа, відсутні пожежні відсіки, що сприяло вільному розповсюдженню пожежі і відповідно швидкому зростанню площі пожежі. Крім цього, в цеху відсутні засоби протипожежного захисту (пожежні сповіщувачі та оповіщувачі), що не дало можливості оперативно виявити пожежу та передати сповіщення про неї до ОДС ДСНС у Закарпатській області.

2. Після отримання повідомлення ОДС не зреагувало на те, що пожежа виникла на деревообробному підприємстві і прислала тільки 5 відділень ПРЧ з м. Іршави і м. Виноградів, що є недостатнім для гасіння пожежі такого об'єкта (на початок роботи перших стволів площа пожежі складала  $792 \text{ м}^2$ ).

3. Внаслідок недостатньої кількості пожежних стволів тривалість локалізації пожежі склала 30 хв, тривалість гасіння – 120 хв, а тривалість кінцевого гасіння – 60 хв.

4. Збитки від пожежі для об'єкта від знищення покрівлі цеху по всій площі, вигорання внутрішнього середовища ділянки і цеху (верстати, майно, документація) та  $220 \text{ м}^3$  деревини склали 4249640 грн, а витрати ПРП на ліквідацію пожежі – 20196 грн.

5. При використанні для ліквідації пожежі на об'єкті «Клен» рекомендацій віртуальної системи (програми) для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі в приміщенні цеху

необхідно було направити на цей об'єкт 16 відділень ПРП ДСНС у Закарпатській області, що дозволило б виконати локалізацію пожежі за 19,5 хв, гасіння – за 26,1 хв, кінцеве гасіння – за 11,4 хв, тобто загальна тривалість ліквідації пожежі була б не більше 57 хв. Крім того, тривалість вільного горіння була б зменшена на 10 хв, площа пожежі не перевищила до перших стволів 527 м<sup>2</sup>. Відповідно збитки об'єкта не перевищили 1141605 грн, а витрати ПРП – 5865 грн.

Такий аналіз використання системи (програми) для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі в приміщенні цеху деревообробного підприємства проводився і для інших пожеж: ТОВ «Свіспан-Лімітед» в м. Костопіль [182]; ТОВ «Лісокомбінат Дубове» в с. Дубове Тячівського району Закарпатської області [100] тощо.

Результати аналізу показали, що система (програма) для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі в приміщенні цеху деревообробного підприємства є надійним помічником (довідником) для визначення оптимальних сил і засобів для ліквідації пожежі в закритих приміщеннях деревообробних підприємств.

Аналогічний аналіз пожеж був виконаний для відкритих складів лісо і пиломатеріалів [215, 216]. Результати аналізу системи (програми) для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння на відкритих складах лісо і пиломатеріалів деревообробних підприємств показали, що використання цієї системи дозволяє оперативно визначати кількість сил і засобів пожежогасіння з надійною імовірністю до 90%. Тому розроблена система для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння на відкритих складах лісо і пиломатеріалів деревообробних підприємств рекомендується для впровадження в ОДС ДСНС України.

#### **4.6. Висновки**

1. Аналіз існуючих критеріїв прийняття рішень в умовах невизначено-

сті дав можливість розробити критерій для оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах, прийнявши за основу тривалість часу для виконання операції локалізації, що дозволяє обґрунтовано перевіряти загальну кількість приладів для ліквідації пожежі загалом.

2. Використання методу статистичного моделювання дозволило визначити імовірності безвідмовної роботи всіх конструктивних елементів всієї системи ліквідації пожежі, яка складається з трьох блоків. Найменшу імовірність безвідмовної роботи, як показали розрахунки, має другий блок, а саме автомобіль гасіння типу АЦ.

3. Основним показником надійності ремонтпридатної пожежної техніки є коефіцієнт готовності, на значення якого впливає, в першу чергу, час, який витрачається на ліквідацію відмови (ремонт) та середнє напрацювання на відмову. Для пожежної техніки значення коефіцієнта готовності коливається в межах від 0,86 до 0,99.

4. Для забезпечення ліквідації пожежі необхідно при визначенні кількості пожежної техніки враховувати її надійність. Результати досліджень показують, що при врахуванні надійності кількість пожежної техніки необхідно збільшувати на 16...17%. При визначенні, наприклад, 10 стволів за існуючою методикою, їх кількість необхідно збільшити на 2 ствола і відповідно кількість пожежних.

5. Вперше розроблена математична модель, алгоритм і програма для ПЕОМ з метою оптимізації кількості сил і засобів пожежогасіння в приміщеннях цехів деревообробних підприємств, яка дозволяє оперативно розв'язувати задачу оптимізації сил і засобів пожежогасіння з імовірністю 90%.

6. Вперше розроблена математична модель, алгоритм і програма для ПЕОМ з метою оптимізації кількості сил і засобів пожежогасіння на відкритих складах лісо і пиломатеріалів деревообробних підприємств, яка

дозволяє з імовірністю 90% оперативно визначати оптимальну кількість сил і засобів для ліквідації пожежі.

7. При розміщені відкритих складів лісоматеріалі необхідно враховувати троянду вітрів і розміщувати квартали складів своєю довгою стороною перпендикулярно до вектору напрямку вітру.

8. Результати аналізу систем для визначення сил і засобів пожежогасіння, які розроблені на основі математичного моделювання процесів ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах, показали їх адекватність дійсним процесам і рекомендуються для впровадження в ОДС та ПРЧ ДСНС України.

## **РОЗДІЛ 5. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТАКТИКИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ**

### **5.1. Локалізація пожежі на деревообробних підприємствах**

В попередніх розділах були розроблені математичні моделі теплових процесів, які виникають в закритих приміщеннях цехів і на відкритих складах лісоматеріалів. Крім цього, розглядалися питання швидкості розповсюдження фронту пожежі з визначенням критичного часу пожежі. В цьому випадку виникає питання про вибір оптимального варіанту плану локалізації пожежі при її виникненні в цеху деревообробного підприємства або на відкритому складі лісоматеріалів. Розв'язуванню цієї задачі і присвячений цей розділ.

#### **5.1.1. Локалізація пожежі в закритому приміщенні цеху**

В залежності від виду виготовлюваної продукції закриті приміщення деревообробних підприємств поділяють на цехи для виробництва клеєних матеріалів і плит, виробів з деревини та спеціального виробництва [234]. Пожежне навантаження в таких цехах є різним і може бути в межах від 50 до 200 кг/м<sup>2</sup> в залежності від виду виробництва, а лінійна швидкість розповсюдження вогню при пожежі знаходиться в межах 2...5 м/хв. Тому виникнення пожежі та її несвоєчасна ліквідація призводять до значних збитків. В роботах [179, 138, 136, 137] для визначення збитків від пожежі використовували загальні витрати у вигляді прямих збитків від пожежі та витрати пожежно-рятувальних частин на її ліквідацію. Але для визначення та прогнозування таких збитків необхідно мати дані статистики, які б були подібними для розглядаемого випадку. Зменшення таких збитків можливо тільки при оперативному та якісному виконанні оптимально необхідних тактичних прийомів підрозділами державної служби надзвичайних ситуацій

для швидкої локалізації і гасіння пожежі. Безумовно для реалізації такої умови необхідно керівнику гасіння пожежі (КГП) мати дуже великий практичний досвід та необхідний довідниковий науково обґрунтований матеріал для швидкого прийняття оптимальних рішень в умовах невизначеності [20].

Існують нормативні документи для орієнтовного визначення тривалості гасіння пожежі, які враховують багаточисельні статистичні дані [92]. Але в кожному конкретному випадку такий підхід не може бути обґрунтованим. Тому виникає проблема у більш точному прогнозуванні часу локалізації пожежі, на значення якого в першу чергу впливає оптимальний для конкретних умов варіант тактичних дій при локалізації та гасінні пожежі. Розв'язування такої проблеми можливо в першу чергу за рахунок розроблення і можливості оперативного використання КГП оптимальних тактичних прийомів для локалізації та гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств. При цьому залишається відкритим питання про те, що робити, якщо не вдається відразу розгорнути достатню кількість стволів і як вибрати першочергове завдання. Розстановку сил і засобів виконує КГП, виходячи з конкретної пожежної ситуації. При цьому тепловий потік від осередку пожежі ускладнює дії пожежних підрозділів. Тому вибір безпечного місця для розміщення сил і засобів важливий ще на етапі розробки плану пожежогасіння.

### **5.1.2. Локалізація пожежі на відкритих складах лісо і пиломатеріалів**

Вивчення пожеж і способів їх гасіння на відкритих складах лісоматеріалів розпочато, наприклад в Росії, в 50 - 60 роки минулого століття з використанням результатів експериментальних досліджень на натурних об'єктах. Узагальнення цих результатів опубліковано в роботах [139, 140]. Пожежі на складах лісоматеріалів характеризуються розкидом іскор і



головешок на значні відстані, радіус яких залежить від висоти їх підйому конвективною колонкою, а також швидкості вітру. Автори даних робіт вказують, що середня швидкість розповсюдження вогню при пожежі на складах круглого лісу становить 0,23 ... 0,36 м/хв. При виникненні пожежі та її несвоєчасній ліквідації виникають значні збитки. Зменшення таких збитків можливо тільки при оперативному та якісному виконанні оптимально необхідних тактичних прийомів для швидкої локалізації і гасіння пожежі. Для реалізації такого положення КГП необхідно мати дуже великий практичний досвід. При цьому необхідно розв'язувати ще не визначені задачі: 1) безпечний рівень теплового потоку від пожежі до пожежних; 2) досяжність водним струменем пожежних стволів штабелів, які охоплені пожежею; 3) відсутність перешкод між водним струменем ствола та штабелем, який охолоджується; 4) обмеження, які пов'язані з тактико-технічними характеристиками стволів та правилами техніки безпеки; 5) розміщення сил і засобів пожежогасіння в безпечних місцях з урахуванням напрямку і швидкості вітру.

## **5.2. Моделювання тактики локалізації та гасіння пожежі**

### **5.2.1. В закритому приміщенні цеху**

Першочерговою задачею процесу гасіння пожежі є її локалізація, від успішного виконання якої залежить швидкість процесу гасіння. Відомо, що існує значна кількість позицій розміщення сил і засобів для проведення процесу локалізації. Тому виникає задача визначення найкращої (оптимальної) позиції їх розміщення, розв'язок якої залежить від багатьох чинників, а саме:

1. Тривалість часу локалізації і гасіння пожежі.
2. Матеріальні втрати від пожежі.
3. Тривалість часу вільного розвитку пожежі.

4. Форма площі пожежі та місце її розміщення в приміщенні.
5. Наявність пожежних відсіків в приміщенні.
6. Безпечний рівень теплового потоку від фронту пожежі.
7. Мінімально необхідна 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 використовуються для локалізації і гасіння пожежі.
10. Правила охорони праці при локалізації і гасінні пожежі.

Пояснимо кожний чинник, який впливає на розміщення сил і засобів для успішної локалізації пожежі. Під тривалістю часу локалізації пожежі будемо розуміти найменший час, який задовольняє всі умови 2...10. В цьому випадку матеріальні втрати від пожежі і пожежно-рятувальних підрозділів повинні бути найменшими.

Тривалість часу вільного розвитку пожежі в значній мірі впливає на тривалість часу локалізації. Цей час в першу чергу залежить від оперативності пожежно-рятувальних підрозділів, тобто від часу початку процесу локалізації першими стволами [36].

Форма площі пожежі та місце її розміщення в приміщенні впливають на розміщення сил і засобів локалізації пожежі. Крім цього, необхідно враховувати розміри приміщення і площу пожежі на час початку її локалізації. Пожежні відсіки затримують процес вільного розвитку пожежі, що сприяє зменшенню матеріальних втрат від пожежі за рахунок зменшення площі пожежі.

Тепловий потік від фронту пожежі може ускладнювати дію пожежних підрозділів і може вимагати їх додаткового захисту згідно із правилами охорони праці при локалізації і гасінні пожежі. Тому необхідно вибирати позицію з меншим тепловим потоком. В процесі локалізації фронт пожежі може бути розміщений за певними перешкодами (колони, пожежні

перегородки відсіків тощо). В практичній ситуації кожний засіб для локалізації пожежі повинен знаходитися на вільному просторі.

На переміщення фронту пожежі в закритому приміщенні впливає вітер, який призводить до надлишкового тиску або розрядження. Тому цей чинник необхідно обов'язково враховувати при розміщенні сил і засобів в процесі локалізації пожежі. При розміщенні пожежних стволів необхідно враховувати їх місця розташування, які б дозволяла подавати струмінь на необхідну глибину від фронту пожежі. Крім цього, треба також враховувати можливу довжину рукавної лінії. Необхідно також враховувати правила охорони праці в процесі локалізації і гасіння пожежі

**Математична постановка задачі оптимізації.** Перший чинник приймаємо за функцію мети, яка в нашому випадку повинна мати при розв'язанні задачі найменше значення, тобто

$$\tau_{лок} + \tau_z \Rightarrow \min . \quad (5.1)$$

**Другий чинник** за умови проведення оптимізації приймаємо за критерій оцінки отриманого результату. Для поставленої задачі матеріальні втрати  $B$  від пожежі повинні бути мінімальними, а саме

$$B \Rightarrow \min . \quad (5.2)$$

Чинники 3...10 є обмеженнями при розв'язку оптимізаційної задачі. В цьому випадку ставиться задача отримання найменшого часу локалізації і гасіння пожежі виходячи з наявних сил і засобів таким чином, щоб виконати обмеження 3...10.

Сформулюємо **основні допущення**, які відносяться до задачі оптимізації.

1. Для проведення локалізації пожежі маємо  $N_{\Sigma}$  пожежних стволів з різним часом оперативного розгортання. Це пов'язано з неодночасним

прибуттям до місця виклику пожежно-рятувальних підрозділів. Тобто тривалість оперативного розгортання  $\tau_{роз}$  залежить від тривалості оперативного розгортання  $\tau_i$  всіх стволів від 1 до  $N_{\Sigma}$

$$\tau_{роз} \in \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{N_{\Sigma}}. \quad (5.3)$$

2. Пожежний ствол за своїми розмірами відносно об'єму приміщення, в якому виникла пожежа, дуже малий. Тому в процесі ліквідації пожежі стволи можуть знаходитися на різній відстані один від одного або відносно об'єктів приміщення.

3. В процесі оперативного розгортання сил і засобів пожежогасіння обставини на пожежі не змінюються.

**Тривалість часу вільного розвитку** пожежі залежить від багатьох чинників роботи пожежно-рятувальних підрозділів [240]. Для обґрунтування розроблення математичної моделі оптимізації тривалості локалізації пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств визначимо прогнозований час з моменту виникнення пожежі до початку її локалізації силами пожежно-рятувальних підрозділів Державної служби надзвичайних ситуацій (ДСНС) України, тобто прогнозований час вільного горіння  $\tau_{в.г}$ :

$$\tau_{в.г} = \tau_{в.в} + \tau_{сн} + \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз}, \quad (5.4)$$

де:  $\tau_{в.в}$  – час з моменту виникнення до моменту виявлення пожежі (на практиці цей час коливається в межах 5...8 хв [37]); середнє значення  $\tau_{в.в} = 6,5$  хв;  $\tau_{сн}$  – час з моменту виявлення пожежі до моменту сповіщення про неї в пожежно-рятувальний підрозділ 3...4 хв [37] (середнє значення  $\tau_{сн} = 3,5$  хв);  $\tau_{о.о}$  – час на отримання та опрацювання сповіщення про пожежу;  $\tau_{о.о} = 1$  хв [166];  $\tau_{з.с}$  – час на залучення сил та засобів гарнізону для гасіння пожежі;  $\tau_{з.с} = 3$  хв (наказ МВС України №325 від 01.07. 1993);  $\tau_{зб}$  – час збору особового складу;  $\tau_{зб} = 1$  хв [166];  $\tau_{сл}$  – середній час слідування на пожежу;  $\tau_{сл} = 13,9$  хв (після статистичної обробки результатів робіт [168, 149, 36, 311]);  $\tau_{роз}$  – час оперативного розгортання;  $\tau_{роз} = 7$  хв [37].

На підставі наведених нормативних і статистичних даних можна за залежністю (5.4) визначити середнє значення тривалості вільного розвитку пожежі:

$$\tau_{6.2} = 6,5 + 3,5 + 1 + 3 + 1 + 13,9 + 7 = 35,9 \text{ хв.}$$

Аналізуючи отриманий результат, можна зробити висновок, що час тривалості вільного розвитку пожежі значний, тобто за цей час на об'єкті, на якому виникла пожежа, відбудуться від її дії значні збитки. Тому необхідно по можливості швидко локалізувати пожежу і приступити до її гасіння. Для цього необхідно для кожного виду пожежі проводити оптимізацію тривалості локалізації пожежі за рахунок раціонального вибору сил і засобів та тактичних планів їх розміщення, що в більшості випадків зменшує час локалізації і гасіння пожежі та відповідно збитки як для об'єкта, так і для пожежно-рятувальних підрозділів.

**Розглянемо можливі обмеження** для оперативного розгортання, які пов'язані з формами площі пожежі та місцями її розміщення в приміщенні. Для цього скористуємося схемою приміщення деревообробного цеху, яка зображена на рис. 5.1.

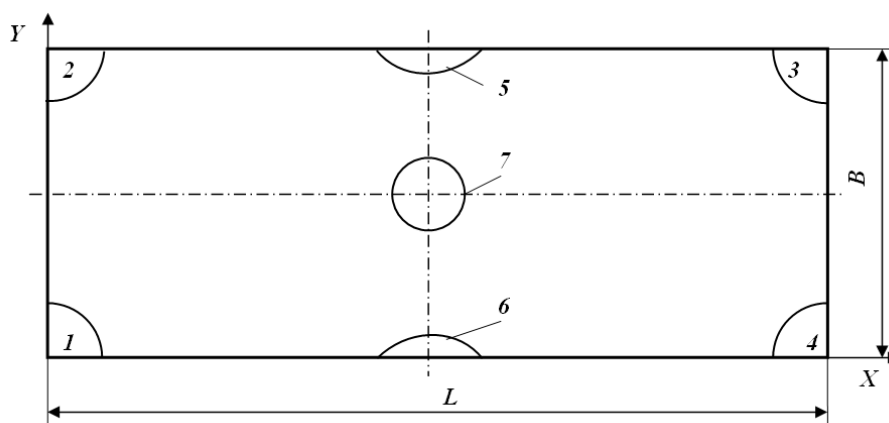


Рис. 5.1. Схема приміщення цеху деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями і формами площі пожежі: 1, 2, 3, 4 – кутова форма (90°); 5, 6 – кутова форма (180°); 7 - кругова

Деревообробні цехи в більшості випадків розміщують в закритих приміщеннях шириною  $B = 72$  м, довжиною  $L = 144 \dots 192$  м і висотою  $H = 6$

м до залізобетонної ферми. Пожежне навантаження в цеху знаходиться в межах  $150 \dots 200 \text{ кг/м}^2$ . Результати аналізу виникнення пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств показали, що існує велика кількість можливих пожежних ситуацій, але в більшості випадків (73%) вони відповідають семи пожежним ситуаціям, які зображені на рис. 5.1 [103]. Розмістивши приміщення цеху в системі координат  $XU$  (рис. 5.1), визначимо координати розміщення кожної пожежної ситуації:  $1(0; 0)$ ;  $2(0; B)$ ;  $3(L; B)$ ;  $4(L; 0)$ ;  $5(0,5L; B)$ ;  $6(0,5L; 0)$ ;  $7(0,5L; 0,5B)$ . Для кожної пожежної ситуації в залежності від площі пожежі можливі різні тактичні плани розміщення сил і засобів для локалізації та гасіння пожежі.

**Наявність пожежних відсіків** в приміщенні цеху значно зменшує швидкість розповсюдження полум'я пожежі. В параграфі 2.4 встановлено, що наявність пожежних відсіків зменшує швидкість розповсюдження пожежі в 1,8 рази. Цей вплив пожежних відсіків на зменшення швидкості розповсюдження полум'я пожежі враховується коефіцієнтом  $\xi = 1,8$ .

**Безпечний рівень теплового потоку** від фронту пожежі впливає на відстань від пожежного зі стволем до фронту пожежі. Для вибору критичного значення густини теплового потоку для пожежного скористуємося рекомендаціями, які наведені в роботі [92] (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Потрібний захист і допустимий час перебування людей в зоні теплової радіації

Густина теплового потоку $q$ , $\text{кВт/м}^2$	Допустимий час перебування людей, хв	Потрібний захист людей	Ступінь теплової дії на шкіру людини
3,0	Не обмежується	Без захисту	Больові відчуття відсутні
4,2	Не обмежується	В захисному одязі та в касці із захищеним склом	Не переносимі больові відчуття через 20 с
7,0	5	Те ж	Не переносимі больові відчуття, які виникають миттєво

Визначимо густину теплового потоку  $q$  від полум'я пожежі в навколишнє середовище закритого приміщення цеху. Для цього скористуємося рекомендаціями, які наведені в роботі [93]

$$q = \frac{\sigma(T_{\phi}^4 - T_0^4)}{\frac{1}{A_{\phi}} + \frac{1}{A_c} - 1 + \frac{3\bar{\alpha}x}{4}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (5.7)$$

де  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – стала Стефана – Больцмана;  $T_{\phi}$  – температура факела полум'я осередка пожежі, К;  $T_0$  – температура навколишнього середовища, К;  $A_{\phi} = 0,9$  – поглинальна здатність факела полум'я [134];  $A_c = 0,6$  – поглинальна здатність середовища [134];  $\bar{\alpha}$  – осереднений за спектром коефіцієнт поглинання середовища  $\bar{\alpha} = 0,89$  м<sup>-1</sup> [135];  $x$  – дійсна відстань між пожежним зі стволем і центром факела осередку пожежі, м.

Температуру  $T_{\phi}$  факела визначаємо за залежністю [52]

$$T_{\phi} = \frac{Q_{\min} \psi_n \tau_{в.з}}{c_p G}, \text{ К} \quad (5.8)$$

де  $Q_{\min}$  – значення найнижчої робочої теплоти згорання горючого навантаження, кДж/кг;  $\psi_n$  – питома швидкість вигорання, кг/м<sup>2</sup>с;  $\tau_{в.з}$  – тривалість вільного розвитку пожежі, с;  $c_p$  – питома теплоємність матеріалу, для якого розглядається пожежа, кДж/кг·К;  $G$  – пожежне навантаження маси оброблювальних матеріалів і обладнання, яке знаходиться в осередку пожежі, кг/м<sup>2</sup>.

Для визначення дійсної відстані  $x$  між пожежним зі стволем і центром факела осередку пожежі на першому етапі визначимо відстань  $l_{\phi}$  в м між центром факела та фронтом пожежі з урахуванням площі пожежі  $S_{II}$  в м<sup>2</sup>.

У випадку кутової пожежі (90°)

$$l_{\phi} = 0,5R_{II} = 0,56\sqrt{S_{II}}. \quad (5.9)$$

Для кутової пожежі ( $180^\circ$ )

$$l_\phi = 0,5R_{II} = 0,4\sqrt{S_{II}}. \quad (5.10)$$

Для кругової пожежі ( $360^\circ$ )

$$l_\phi = R_{II} = 0,56\sqrt{S_{II}}. \quad (5.11)$$

Тоді дійсна відстань між пожежним зі стволем і центром факела осередку пожежі

$$x = l_\phi + l_q,$$

де  $l_q$  – відстань пожежного зі стволем від фронту пожежі, яка залежить від потрібного термозахисту і допустимого часу його перебування в зоні теплової радіації, м.

Для спрощення виконання процесу розв'язування оптимізаційної задачі була отримана залежність для визначення відстані пожежного зі стволем від фронту пожежі  $l_q$  в м на підставі багаточисельних розрахунків за залежностями (5.7) – (5.11) з обробленням отриманих результатів методами математичної статистики

$$l_q = 23,2 \left( \frac{S_{II}^{0,27}}{[q]} \right)^{0,7}, \quad (5.12)$$

де  $[q]$  – допустиме значення густини теплового потоку для заданих умов локалізації і гасіння пожежі, кВт/м<sup>2</sup>.

**Мінімально необхідна кількість пожежних стволів** для локалізації і гасіння пожежі може бути визначена на підставі рекомендацій робіт [48, 69]. Згідно із рекомендаціями визначаємо кількість стволів  $B$  на гасіння ( $N_A^A$ ) і захист ( $N_A^C$ )



$$N_{\bar{A}}^{\bar{A}} = \frac{Q_i^{\bar{A}}}{Q_B}; \quad (5.13)$$

$$N_{\bar{A}}^C = \frac{Q_i^C}{Q_B}, \quad (5.14)$$

де:  $Q_n^{\Gamma}$  і  $Q_n^3$  – відповідно потрібний прогнозований розхід вогнегасної речовини на локалізацію і гасіння пожежі та захист, л/с;  $Q_B$  – розхід вогнегасної речовини стволом  $B$ , л/с (розхід при тиску вогнегасної речовини 0,4 МПа і діаметру насадки  $d = 13$  мм становить 3,7 л/с)

$$Q_n^{\Gamma} = S_{\Pi} I_n^{\Gamma}; \quad (5.15)$$

$$Q_n^3 = 0,25 K_3 S_{\Pi} I_n^{\Gamma}, \quad (5.16)$$

$I_n^{\Gamma}$  – інтенсивність подачі вогнегасної речовини для локалізації гасіння пожежі, л/м<sup>2</sup>с (рекомендоване значення для ручних стволів  $I_n^{\Gamma} = 0,2$  л/м<sup>2</sup>с);  $K_3 = 2,0 \dots 2,2$  – коефіцієнт, який враховує збільшення площі захисту у порівнянні з площею пожежі.

На підставі отриманих даних визначаємо загальну кількість  $N_{B\Sigma}$  стволів  $B$  для локалізації і гасіння пожежі

$$N_{\bar{A}\Sigma} = N_{\bar{A}}^{\bar{A}} + N_{\bar{A}}^C. \quad (5.17)$$

Визначене значення  $N_{B\Sigma}$  заокруглюють до цілого числа в більшу сторону. Після цього визначають кількість стволів  $A$  ( $N_A$ ) на локалізацію і гасіння від загальної кількості стволів  $N_{\bar{A}}^{\bar{A}}$  на підставі рекомендацій [92]

$$N_A = 0,3 N_{\bar{A}}^{\bar{A}}. \quad (5.18)$$

Тоді загальна кількість стволів буде

$$N_{\Sigma} = N_{\bar{A}} + N_{\bar{A}}^{\zeta} + N_A. \quad (5.19)$$

**Швидкість вітру** впливає на надлишковий тиск або розрядження в осередку закритого приміщення, що призводить до зміни швидкості розповсюдження полум'я пожежі, яка виникла в цьому приміщенні. Для такого аналізу скористуємося рекомендаціями, які наведені в [92]. Аналіз проведемо на підставі розгляду тиску або розрядження на висоті від підлоги до площини рівних тисків у відділеннях прямокутного приміщення деревообробного цеху (рис. 5.3), на які впливає кут дії  $\alpha_v$  вітру, тобто від напрямку дії якого залежить значення аеродинамічного коефіцієнту  $k_v$  (табл. 5.2).

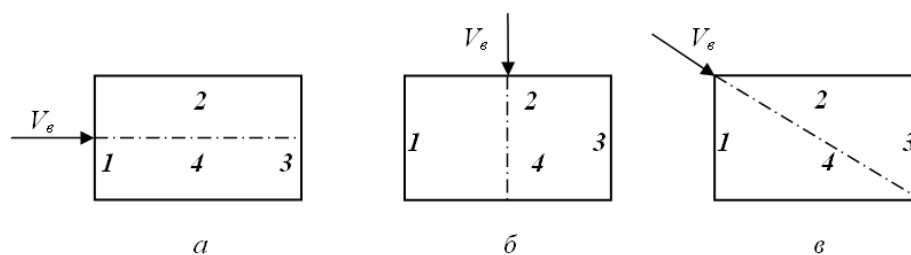


Рис. 5.2. Схеми приміщень та їх відділень з напрямом дії на них вітру

Таблиця 5.2

Значення аеродинамічних коефіцієнтів для приміщень прямокутної форми

Кут дії вітру $\alpha_v$ , град	0° рис. 5.2, а				90° рис. 5.2, б				45° рис. 5.2, в			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Значення аеродинамічного коефіцієнта $k_v$	0,65	-0,37	-0,15	-0,37	-0,52	0,66	-0,52	-0,24	0,36	0,36	-0,38	-0,48

На підставі наведених даних можна для кожної ділянки приміщення цеху визначити абсолютне значення надлишкового тиску або розрядження  $\Delta P_6$  в Па від дії вітру за залежністю

$$|\Delta P_6| = \frac{177,2 V_6^2 k_6}{T_c g}, \quad (5.20)$$

де  $V_6$  – швидкість вітру, м/с;  $k_6$  – аеродинамічний коефіцієнт (табл. 5.2);  $T_c$  – середньооб’ємна температура середовища для розглядаємої ділянки цеху, К;  $g$  – прискорення вільного падіння (9,81 м/с<sup>2</sup>).

Швидкість переміщення газів залежить в першу чергу від перепаду тисків. З урахуванням рівняння Бернуллі та результатами досліджень по впливу швидкості переміщення газів на швидкість розповсюдження полум’я пожежі була отримана залежність для врахування цієї швидкості на зміну швидкості розповсюдження пожежі

$$\Delta v_n = 5,35 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{2|\Delta P_6|}{\rho_m}}, \quad (5.21)$$

де  $\rho_m$  – середньооб’ємна густина середовища для розглядаємої ділянки цеху, яка залежить від середньооб’ємної температури  $T_c$  в град К, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_m = \frac{354,33}{T_c}. \quad (5.22)$$

Тоді дійсна швидкість  $V_{II}$  розповсюдження полум’я пожежі буде

$$V_{II} = v_n \pm \Delta v_n. \quad (5.23)$$

В залежності (5.23) знак «+» приймають при переході пожежі з ділянки цеху із надлишковим тиском на ділянку з розрядженням і знак «-» – для протилежного випадку.

**Тактико-технічні характеристики пожежних стволів** згідно із ДСТУ 2112-92, які використовуються для локалізації і гасіння пожеж класу А, наведені в табл. 5.3.

**Правила охорони праці** при локалізації і гасінні пожежі зобов'язують кожного пожежного, у випадку виникнення у зоні ліквідації пожежі небезпечних чинників, використовувати згідно із наказом № 1342 від 16.12.2011 року МНС України газодимозахисне спорядження та захисний одяг.

Таблиця 5.3

Технічні характеристики пожежних стволів

Параметри	Тип ствола					
	РС-50	РС-70	РСК-50	РСП-50	РСП-70	РСКЗ-70
Робочий тиск, МПа	0,4...0,6					
Витрати води, л/с:						
- суцільного струменя	3,6	7,4	2,7	2,7	7,4	7,4
- розпиленого	-	-	2,0	2,0	7,0	7,0
- захисної завіси	-	-	-	-	-	2,3
Дальність водяного струменя $L$ , м (не менше):						
суцільного	28	32	30	30	32	32
розпиленого	-	-	11	11	9	9
Кут факела розпиленого струменя, град	-	-	40...70	40	40	40
Діаметр насадки, мм	13	19	12	12	19	19
Маса, кг	0,7	1,5	1,95	1,45	2,8	3,0

Розглянемо необхідність використання газодимозахисного спорядження та захисного одягу для ліквідації пожежі в закритому приміщенні цеху деревообробного підприємства, в яких головним чином виникають пожежі класу А. Встановлено, що в таких приміщеннях критичний час пожежі, при якому можливе перебування людей і вони не можуть постраждати від температури та виділених при горінні токсичних речовин, не перевищує 5...10 хв. Але пожежно-рятувальні підрозділи прибувають на місце виникнення пожежі в середньому через 20...40 хв. За цей час вільного розвитку пожежі заходять в приміщення цеху без захисного спорядження для органів дихання недопустимо. Крім цього, враховуючи

максимально можливу довжину суцільного струменя пожежного ствола для локалізації і гасіння пожежі необхідно пожежного захистити спеціальним захисним одягом.

Для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі необхідно використовувати апарат на стисненому повітрі SCBA ProffAir APS/4. Захист пожежного від теплової радіації необхідно виконувати за рахунок використання термозахисних костюмів «Індекс-1», «Індекс-3» та «Індекс-1200», які дозволяють працювати при температурі 200°C на протязі 15 хв, а термозахисний костюм «Індекс-1200» – при температурі 1200°C до 5 хв.

Для обґрунтованого прийняття рішення про необхідність використання пожежним термозахисного костюма скористуємося залежністю (5.12), на підставі якої визначимо дійсне мінімальне значення теплової радіації  $q_{\min}$  в кВт/м<sup>2</sup> в залежності від максимально допустимої відстані пожежного  $l_{q\max}$  в м від фронту пожежі при площі пожежі  $S_{\Pi}$  в м<sup>2</sup>

$$q_{\min} = \frac{90\sqrt[3]{S_{\Pi}}}{\sqrt{l_{q\max}^3}}. \quad (5.24)$$

Після розгляду **всіх основних чинників**, які впливають на розміщення сил і засобів для успішної локалізації пожежі, переходимо до розгляду **тактичних дій** пожежно-рятувальних підрозділів для локалізації і гасіння пожежі. Для гасіння пожеж в цехах деревообробляючих виробництв головним чином використовують воду [181].

При виникненні пожежі черговий обслуговуючий персонал зупиняє роботу верстатів, відсмоктуючої вентиляції та силових електроустановок. Після цього виконується евакуація з приміщення цеху, в якому виникла пожежа, всіх працюючих згідно з евакуаційними планами.

По приїзду пожежно-рятувальних підрозділів на об'єкт, де виникла пожежа, в процесі їх оперативного розгортання, в першу чергу необхідно

поставити пожежні автомобілі на найближчі вододжерела і розміщувати пожежних зі стволами по фронту розповсюдження пожежі. Крім цього, також треба розміщувати пожежних зі стволами  $B$  на захист обладнання і крівлі.

При виникненні пожежі в місцях цеху  $1...7$  (рис. 5.1) можливі наступні варіанти тактики локалізації пожежі:

**Тактичний варіант 1.** У випадку виникнення пожежних ситуацій  $1...4$  розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по фронту пожежі з внутрішньої протилежної сторони середовища приміщення, в якому відсутня пожежа.

**Тактичний варіант 2.** У випадку виникнення пожежних ситуацій  $5...6$  розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по фронту пожежі з правої і лівої сторони середовища приміщення, в яких відсутня пожежа.

**Тактичний варіант 3.** У випадку виникнення пожежної ситуації  $7$  розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують за двома протилежно розміщеним фронтам пожежі, яка виникла в центральній частині цеху, з правої і лівої сторони середовища приміщення, в яких відсутня пожежа.

Крім цього, при виконанні кожного тактичного варіанту необхідно миттєво вводити стволи для захисту на шляхах розповсюдження вогню, для захисту технологічного обладнання, несучих будівельних конструкцій та крівлі.

Після розгляду всіх питань, які пов'язані з математичною постановкою задачі оптимізації, переходимо до **розроблення оптимізаційної математичної моделі** тактики локалізації і гасіння пожежі.

**Вхідні дані:** 1) координата пожежі  $I(x; y)$ , де  $I = 1, 2, \dots, 7$  – номер можливої пожежної ситуації; 2) наявність пожежних відсіків  $\zeta$  (у випадку коли  $\zeta = 1$ , пожежні відсіки відсутні; при  $\zeta = 1,8$  – в цеху розміщені пожежні відсіки); 3)  $v_n$  – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/с; 4) швидкість вітру  $V_v$ , м/с; кут дії вітру  $\alpha_v$ , град; ділянка цеху з надлишковим тиском від вітру приймати « $+\Delta v_n$ », у випадку розрядження – « $-\Delta v_n$ »; 5) тип ствола  $N_B$  та

$L_{\max}$ ; тип ствола  $N_A$  та  $L_{\max}$ ; 6) тип термозахисних костюмів і апаратів для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі, вибір яких залежить від  $q_{\min}$  і часу тривалості вільного розвитку пожежі; 7) тактичні варіанти розміщення сил і засобів локалізації і гасіння пожежі, кожен з яких вибирається в залежності від координати пожежі  $I(x; y)$  в цеху; 8) значення обмежень  $a_i$  і  $b_i$ , які необхідно визначити заздалегідь; 9)  $[p]$  – допустиме значення імовірності для прийняття оптимального значення функції мети.

### Функція мети

$$\tau_{\text{лок}} + \tau_2 \Rightarrow \min; \quad (5.25)$$

за критерієм

$$B = B_o + B_n \Rightarrow \min; \quad (5.26)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq N_A^{\bar{A}} \leq b_1; \quad (5.27)$$

$$a_2 \leq N_A^{\bar{C}} \leq b_2; \quad (5.28)$$

$$a_3 \leq N_A \leq b_3; \quad (5.29)$$

$$a_4 \leq \tau_{e,z} \leq b_4; \quad (5.30)$$

$$a_5 \leq l_q \leq b_5; \quad (5.31)$$

$$p \geq [p], \quad (5.32)$$

де  $\tau_{\text{лок}}$  – час локалізації пожежі, хв;  $\tau_2$  – час гасіння пожежі, хв; значення цих часів визначаємо за залежностями [272]

$$\tau_{\bar{e}\bar{e}} = \frac{6,39 S_{\bar{e}\bar{e}}^{0,893}}{2N_A + N_A^{\bar{A}}} K_I K_d; \quad \tau_2 = \tau_{\text{лок}} \left( \frac{S_{II}}{S_{\text{лок}}} - 1 \right); \quad (5.33)$$

$S_{\text{лок}}$  – площа локалізації, м<sup>2</sup>;

$K_I$  – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання  $I_n^I$  (л/м<sup>2</sup>с) в осередок пожежі вогнегасної речовини;

$K_d$  - коефіцієнт, який враховує вплив діаметра насадки  $d$  (мм) ствола (рекомендоване значення діаметра насадки для ручних стволів  $N_B d = 13$  мм; для стволів  $N_A d = 19$  мм; для розрахунку приймають середнє значення  $d = 16$  мм);

для кругової і кутової пожеж  $S_{лок} = [2 \frac{V_{II}}{\xi} (\tau_{e,z} - 5)h - h^2] \alpha$ ;

$h$  – глибина подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі ( $h = 5$  м для ручних стволів [92]);

$$S_{II} = [25 + (\tau_{e,z} - 10)^2] \frac{V_{II}^2}{\xi^2} \alpha \text{ при } \tau_{e,z} > 10 \text{ хв};$$

$$K_l = 1,62 - 3,04 I_n^r; K_d = 1,4983 - 0,0262 d;$$

$\alpha$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі: кругова  $360^\circ \alpha = 3,14$  рад; кутова  $180^\circ \alpha = 1,57$  рад; кутова  $90^\circ \alpha = 0,785$  рад;

$B_o$  – прямі збитки на об'єкті від пожежі, грн;

$$B_o = C_o S_{II};$$

$C_o$  – середня вартість  $1\text{ м}^2$  площі об'єкта, на якому виникла пожежа, грн/м<sup>2</sup>;

$B_n$  – витратами пожежно-рятувальних частин, які брали участь в її ліквідації пожежі, грн. ( $B_n = C_B \tau_{л.н}^{-0,8725}$ ;  $C_B = 1,68 \cdot 10^5$  – коефіцієнт пропорційності);

$\tau_{л.н} = \tau_{лок} + \tau_z$  – сумарна тривалість локалізації і гасіння пожежі, хв;

$a_1, a_2, \dots a_5$  – мінімальні значення обмежень;

$b_1, b_2, \dots b_5$  – максимальні значення обмежень;

$p$  – імовірність попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків ( $p = k / N$ , де  $k$  – кількість циклів роботи програми, при яких досліджувальні точки попали в область допустимих розв'язків;  $N$  – загальна кількість циклів роботи програми);

$[p]$  – допустиме значення імовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення.

Значення обмежень  $a_1, a_2, a_3$  можна приймати однаковими і такими, що дорівнюють одиниці. Такий підхід можна обґрунтувати тим, що при приїзді першої пожежної автомашини, на якій знаходиться одна ланка, яка може після оперативного розгортання залучити до локалізації пожежі тільки таку



кількість засобів пожежогасіння. Значення обмежень  $b_1, b_2, b_3$  визначають за залежностями (5.13), (5.14) і (5.18) відповідно. Мінімальне значення обмеження  $a_4$  можна визначити за залежністю

$$a_4 = \frac{60Lk_n}{V_{cl}} + 20,5, \text{ хв} \quad (5.34)$$

де  $L$  – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, на якому виникла пожежа, км;  $k_n$  – коефіцієнт, який враховує непрямолінійність вуличної мережі (в містобудівельній практиці його максимальне значення приймають  $k_n = 1,4$ );  $V_{cl}$  – середня швидкість руху пожежних автомобілів, км/год (в денний час  $V_{cl} = 32$  км/год; вночі – до 60 км/год [272]).

Максимальне значення обмеження  $b_4$  приймаємо як середньостатистичне значення часу вільного горіння

$$b_4 = \frac{60Lk_n}{V_{cl}} + 29, \text{ хв.} \quad (5.35)$$

Мінімальне значення обмеження  $a_5$  приймаємо 10 м, а максимальне значення  $b_5 = L_{\max} - h$ .

Для розв'язування оптимізаційної моделі скористуємося методом Монте-Карло [59]. Область допустимих розв'язків, яка визначається обмеженнями (5.27)...(5.31), оточують  $m$ -мірним паралелепіпедом, в якому проводимо дослідження. Поставлену задачу краще всього розв'язувати з використанням ПЕОМ. За допомогою давача комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$  в інтервалі  $0 \dots 1$ . Для перетворення псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$ , які рівномірно розподілені в інтервалі  $0 \dots 1$ , до значень  $N_B^T, N_B^3, N_A, \tau_{в.2}$  та  $l_q$  використовуємо залежності виду, наприклад, для  $l_q$

$$l_{qi} = a_5 + \mu_{si}(b_5 - a_5)$$

де:  $\mu_{5i}$  – псевдовипадкове число для визначення чинника  $l_{qi}$  на певному  $i$ -тому циклі розрахунку.

В процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначаються значення  $\tau_{лок}$  і  $\tau_2$  за залежностями (5.33) та критеріїв  $B_o$  і  $B_n$ , які перевіряються зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконуються до тих пір, поки буде виконана умова (5.32). Після завершення роботи програми на друк видаються такі дані:  $S_{II}$  на час початку локалізації;  $\tau_{сл}$ ,  $V_{II}$ ,  $\tau_{лок}$  і  $\tau_2$ ,  $N_A^A$ ,  $N_A^C$ ,  $N_A$ ,  $l_q$ ,  $p$ ; тип апарату для захисту органів дихання та зору; тип термозахисного одягу; тривалість роботи в осередку пожежі, хв; тактичний варіант локалізації і гасіння пожежі; місця та ділянки для захисту об'єкта і обладнання від полум'я пожежі та температури.

### 5.2.2. На відкритих складах лісо і пиломатеріалів

Перші кроки по встановленню вимог до виконання максимального об'єму тактичних робіт на пожежі були розглянуті в роботі [92], що стало основою для прийняття відповідних обмежень в процесі розроблення математичних моделей для оптимального розміщення сил і засобів локалізації пожежі. Вперше моделювання дій пожежних підрозділів по локалізації пожеж в резервуарних парках розглянуто в роботах [2, 3]. Стосовно відкритих складів лісоматеріалів деревообробних підприємств подібних математичних моделей, як показав аналіз публікацій, не розроблялося. Тому ставиться задача розробити математичну модель, яка б дозволяла, виходячи з умов пожежі, приймати оптимальний тактичний план розміщення сил і засобів для локалізації та гасіння пожежі на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств.

Постановку задачі будемо будувати з використанням рекомендацій [220], на підставі яких розглянемо план розташування штабелів одного кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання. Згідно цих рекомендацій площа кварталу груп штабелів круглих лісоматеріалів слід

приймати не більше 4,5 га. Ширина кожної групи штабелів в кварталі може бути не більше 50 м, а кварталу - не більше 100 м. Групи штабелів круглих лісоматеріалів в кварталі слід відокремлювати між собою поздовжніми і поперечними розривами. Ширина поздовжніх розривів повинна бути не менше полуторної висоти, а поперечних - не менше однієї висоти штабелів. По поздовжніх розривах слід передбачати тверде покриття завширшки не менше 3 м для проїзду пожежних машин. Відстані від штабелів круглих лісоматеріалів до середини зазначених доріг слід приймати з урахуванням кута природного розсіпання штабелів при пожежі, але не менше 8 м. На підставі розглянутих рекомендацій план розташування штабелів одного кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання зображений на рис. 5.3.

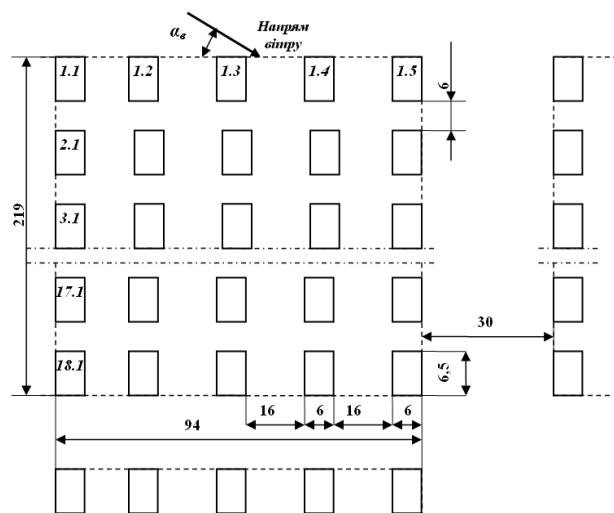


Рис. 5.3. План кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання

Основні параметри кварталу складу: штабелі згідно рекомендацій [67] розміром  $b \times l \times h = 6 \times 6,5 \times 6$  м; ширина поздовжніх розривів між штабелями  $b_n = 16$  м; ширина поперечних розривів між штабелями  $b_{non} = 6$  м; загальна кількість поздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною  $B_k = 94$  м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною  $L_k = 219$  м; загальна площа кварталу  $20586 \text{ м}^2 \approx 2$  га; протипожежні розриви між кварталами при висоті штабелів 6 м дорівнюють 30 м.

Першочерговою задачею процесу гасіння пожежі є її локалізація, від успішного виконання якої залежить швидкість процесу гасіння. Відомо, що існує значна кількість позицій розміщення сил і засобів для проведення процесу локалізації. Тому виникає задача визначення найкращої (оптимальної) позиції їх розміщення. При розміщенні пожежних стволів необхідно враховувати їх місця розташування, які б дозволяла подавати струмінь на необхідну глибину від фронту пожежі. Крім цього, треба також брати до уваги можливу довжину рукавної лінії. Необхідно також забезпечувати правила охорони праці для пожежних в процесі локалізації і гасіння пожежі.

**Математична постановка задачі оптимізації.** Для формулювання оптимізаційної задачі необхідно в першу чергу прийняти функцію мети, яка впливає на величину витрат від пожежі. Такими чинниками, які впливають на значення витрат в процесі ліквідації пожежі є час локалізації пожежі  $\tau_{лок}$  та час гасіння  $\tau_2$  в хв. В цьому випадку **функція мети** буде як сума цих чинників, яка повинна мати мінімальне значення

$$\tau_{лок} + \tau_2 \Rightarrow \min . \quad (5.36)$$

Значення цих чинників визначаємо за залежностями [272]

$$\tau_{ві\dot{\epsilon}} = \frac{6,39S_{ві\dot{\epsilon}}^{0,893}}{2N_A + N_A^A} K_I K_d ; \quad \tau_2 = \tau_{лок} \left( \frac{S_{II}}{S_{лок}} - 1 \right), \quad (5.37)$$

де  $S_{лок}$  – площа локалізації, м<sup>2</sup>;

$K_I$  – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання  $I_n^r$  (л/м<sup>2</sup>с) в осередок пожежі вогнегасної речовини;

$K_d$  - коефіцієнт, який враховує вплив діаметра насадки  $d$  (мм) ствола (рекомендоване значення діаметра насадки для ручних стволів  $N_B d = 13$  мм; для стволів  $N_A d = 19$  мм; для розрахунку приймають середнє значення  $d = 16$  мм);

для кругової і кутової пожежі  $S_{лок}$ , м<sup>2</sup>

$$S_{лок} = l_{\phi} (h + h_{лок}); \quad (5.38)$$

$l_{\phi}$  – довжина (периметр) фронту пожежі, м;

$l_{\phi} = 2(b + l + b_n + b_{non})n$ ;  $h$  – висота штабеля, м;

$h_{лок}$  – глибина подачі вогнегасної речовини, м ( $h_{лок} = 5$  м);

$b$  – ширина штабеля, м;

$l$  – довжина штабеля, м;

$b_n$  – ширина повздовжніх проїздів між штабелями, м;

$b_{non}$  – ширина поперечних проїздів між штабелями, м;

$n$  – кількість штабелів, яка охоплена пожежею за час  $\tau_{в.г}$  вільного горіння

$$n = \frac{[25 + (\tau_{в.г} - 10)^2] V_{Пв}^2 \alpha}{(b + b_n)(l + b_{non})}; \quad (5.39)$$

$$K_l = 1,62 - 3,04 I_n^r; \quad (5.40)$$

$$K_d = 1,4983 - 0,0262d; \quad (5.41)$$

$\alpha$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі: кругова (360°)  $\alpha = 3,14$  рад; кутова (180°)  $\alpha = 1,57$  рад; кутова (90°)  $\alpha = 0,785$  рад;

$S_{П}$  – площа пожежі, м<sup>2</sup>;

$$S_{П} = [25 + (\tau_{в.г} - 10)^2] V_{Пв}^2 \alpha; \quad (5.42)$$

$V_{Пв}$  – найбільш вірогідна швидкість розповсюдження полум'я по штабелю, м/хв;

$$V_{Пв} = 60 V_{П} K_{\epsilon} K_{\alpha}; \quad (5.43)$$

$V_{П}$  – швидкість розповсюдження полум'я по штабелю, м/с;

$K_g$  – коефіцієнт, який враховує вплив швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я по штабелю

$$K_g = 0,9912 \exp(0,0388V_g); \quad (5.44)$$

$V_g$  – швидкість вітру, м/с;  $K_\alpha$  – коефіцієнт, який враховує вплив напрямку дії вектора швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я по штабелю

$$K_\alpha = -5 \cdot 10^{-5} \alpha_g^2 + 0,0123 \alpha_g + 0,374; \quad (5.45)$$

$\alpha_g$  – кут напрямку вітру (при  $\alpha_g = 90^\circ$  розглядається попутний напрям вітру, який співпадає з повздовжнім або поперечним розміщенням штабелів кварталу (рис. 5.3) і переміщує пожежу на квартал; при  $\alpha_g = 270^\circ$  – зустрічний напрям вітру; крім цього, при виникненні пожежі по периметру кварталу попутний напрям вітру необхідно розглядати з тієї з чотирьох сторін кварталу, на якій виникла пожежа; при виникненні пожежі в центрі кварталу необхідно розглядати тільки попутний напрям вітру), град;

$\tau_{в.з}$  – тривалість вільного розвитку пожежі, хв.

Для визначення площі пожежі  $S_{П}$  скористуємося результатами аналізу виникнення пожеж на складах лісоматеріалів деревообробних підприємств, які показали, що існує велика кількість можливих пожежних ситуацій, але в більшості випадків (86%) вони відповідають тринадцяти пожежним ситуаціям, які зображені на рис. 5.5 [103]. Розмістивши квартал складу лісоматеріалів в системі координат  $XU$  (рис. 5.4), визначимо координати розміщення кожної пожежної ситуації: 1(0;  $L_k$ ); 2( $B_k$ ;  $L_k$ ); 3(0; 0); 4( $B_k$ ; 0); 5(0,5 $B_k$ ;  $L_k$ ); 6(0; 0,75 $L_k$ ); 7( $B_k$ ; 0,75 $L_k$ ); 8(0; 0,5 $L_k$ ); 9( $B_k$ ; 0,5 $L_k$ ); 10(0; 0,25 $L_k$ ); 11( $B_k$ ; 0,25 $L_k$ ); 12(0,5 $B_k$ ; 0); 13(0,5 $B_k$ ; 0,5 $L_k$ ). Для кожної пожежної ситуації в залежності від площі пожежі можливі різні тактичні плани розміщення сил і засобів для локалізації та гасіння пожежі.

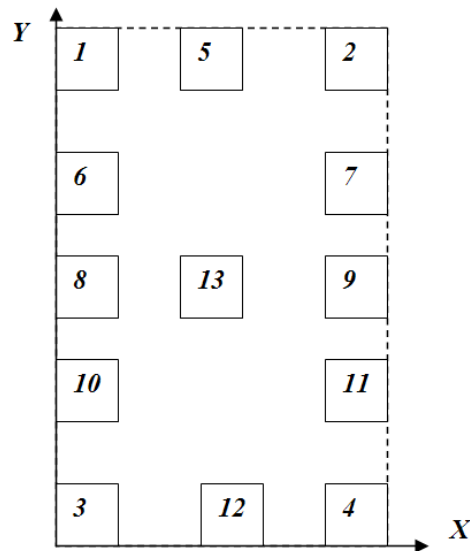


Рис. 5.4. Схема кварталу склада лісоматеріалів деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями

Аналізуючи схему кварталу склада лісоматеріалів (рис. 5.5) можна зауважити, що виникненні пожежі на ділянках 1, 2, 3, і 4 є кутовими 90°, на ділянках 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 – кутовими 180°, а на ділянці 13 – кругова 360°.

В цьому випадку площі пожежі можна визначити за залежностями:

- кутова пожежа 90° (ділянки складу: 1, 2, 3, 4, рис. 5.4)

$$S_{II} = 16,67n^{1,18}bl, \text{ м}^2; \quad (5.46)$$

- кутова пожежа 180° (ділянки складу: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 рис. 5.4)

$$S_{II} = 22,29n^{1,34}bl, \text{ м}^2; \quad (5.47)$$

- кругова пожежа 360° (ділянка складу 13 рис. 5.4)

$$S_{II} = 29,72n^{1,35}bl, \text{ м}^2 \quad (5.48)$$

де  $n$  – кількість груп загорянь штабелів в залежності від форми пожежі

$$n = \frac{0,25V_{П6} \tau_{6,2}}{\sqrt{\frac{bl + 2h(b+l)}{\alpha}}}. \quad (5.49)$$

Визначаємо кількість пожежних стволів для подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі. Для цього скористуємося рекомендаціями роботи [181]. На підставі цих рекомендацій ( $Q_B = 3,7$  л/с;  $I_n^r = 0,2$  л/м<sup>2</sup>с) визначаємо кількість стволів  $B$  на гасіння ( $N_A^{\bar{A}}$ ) і захист ( $N_A^C$ )

$$N_A^{\bar{A}} = 0,054S_f; \quad N_A^C = 0,027S_f. \quad (5.50)$$

Кількість стволів  $A$  ( $N_A$ ) на локалізацію і гасіння від загальної кількості стволів  $N_B^r$  на підставі рекомендацій [92]

$$N_A = 0,3N_A^{\bar{A}}. \quad (5.51)$$

Одночасно були проведені дослідження надійності пожежної техніки з використанням методу статистичного моделювання, на підставі результатів яких було встановлено, що імовірність безвідмовної роботи всієї системи для пожежогасіння не перевищує  $R_c(\tau) = 0,8473$ .

Тоді необхідна дійсна кількість стволів для ліквідації пожежі визначається так

$$(N_A^{\bar{A}})_{\bar{a}} = \frac{N_A^{\bar{A}}}{R_c(\tau)}; \quad (N_A^C)_{\bar{a}} = \frac{N_A^C}{R_c(\tau)}; \quad (N_A)_o = \frac{N_A}{R_c(\tau)}; \quad (5.52)$$

$$N_A = (N_A^{\bar{A}})_{\bar{a}} + (N_A^C)_{\bar{a}}; \quad (5.53)$$

$$N_{\Sigma} = (N_A^{\bar{A}})_{\bar{a}} + (N_A^C)_{\bar{a}} + (N_A)_o. \quad (5.54)$$

Основною тактико-технічною характеристикою розглянутих пожежних стволів є дальність подачі суцільного струменя, яка коливається в межах  $L_{\max}$



= 28...32 м.

Одночасно визначаємо потрібну кількість відділень  $N_{\bar{a}}$  для ліквідації пожежі

$$N_{\bar{a}} = 0,25(2(N_A)_{\bar{a}} + N_A + 0,17N_{\Sigma} + 2), \quad (5.55)$$

а також загальну кількість пожежних автоцистерн і спеціальних машин

- пожежних автоцистерн

$$N_{n.a} = N_{\bar{a}}; \quad (5.56)$$

- спеціальних машин  $N_{n.c}$  в залежності від загальної кількості працюючих  $N_n$ , яка знаходиться на території кварталу склада де виникла пожежа

$$N_{n.c} = 0,011N_n \geq 1. \quad (5.57)$$

Після розгляду функції мети переходимо до визначення **критерію оптимізації**. За критерій оптимізації вибору тактики локалізації і гасіння пожежі, згідно із рекомендаціями [110], приймаємо втрати як для об'єкта  $B_o$ , так і для пожежно-рятувальних підрозділів  $B_n$ , які повинні бути мінімальними

$$B_o + B_n \Rightarrow \min; \quad (5.58)$$

$$B_o = C_o V_{П\bar{a}}^2 \alpha (\tau_{\bar{a}.z}^2 - 20\tau_{\bar{a}.z} + 0,25\tau_{лок}^2 + 125); \quad (5.59)$$

$$B_n = C_n \tau_{з.н.н} N_{\bar{a}}; \quad (5.60)$$

$$\tau_{з.н.н} = \tau_{o.o} + \tau_{з.c} + \tau_{з\bar{o}} + \tau_{cl} + \tau_{роз} + \tau_{лок} + \tau_z + \tau_{лік}, \quad (5.61)$$

де  $C_o$  – вартість одного м<sup>2</sup> площі об'єкта, яка знищена пожежею, грн/м<sup>2</sup>;

$C_n$  – вартість однієї хвилини роботи одного пожежно-рятувального відділення в процесі ліквідації пожежі, грн/хв;

$\tau_{з.п.п}$  – прогнозований час зайнятості пожежно-рятувального підрозділу для ліквідації пожежі, хв;

$\tau_{о.о}$  – час на отримання та опрацювання сповіщення про пожежу, хв;

$\tau_{з.с}$  – час на залучення сил та засобів гарнізону для гасіння пожежі, хв (наказ МВС України №325 від 01.07. 1993);

$\tau_{зб}$  – час збору особового складу, хв;

$\tau_{сл}$  – час слідування на пожежу, хв;

$$\tau_{сл} = \frac{60Lk_n}{V_{сл}}; \quad (5.62)$$

$L$  – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, на якому виникла пожежа, км;

$k_n$  – коефіцієнт, який враховує не прямолінійність вуличної мережі (в містобудівельній практиці його максимальне значення приймають  $k_n = 1,4$ );

$V_{сл}$  – середня швидкість руху пожежних автомобілів, км/год (в денний час  $V_{сл} = 32$  км/год; вночі – до 60 км/год [157]);

$\tau_{роз}$  – час оперативного розгортання, хв;

$\tau_{лік} = 0,25(\tau_{лок} + \tau_c)$  – час на закінчення ліквідації пожежі (остаточне гасіння), хв.

Значення складових  $\tau_{о.о}$ ,  $\tau_{з.с}$ ,  $\tau_{зб}$ ,  $\tau_{роз}$  наведені роботі [37] та в нормативному документі [166].

Визначивши критерій оптимізації, переходимо до **встановлення обмежень** при виконанні тактичних дій для ліквідації пожежі. Першими основними обмеженнями є використання пожежних стволів  $(N_A^{\bar{A}})_{\bar{a}}$ ,  $(N_A)_d$  для гасіння і  $(N_A^c)_{\bar{a}}$  для захисту. Мінімальна кількість цих стволів може бути відповідно  $a_1 = a_2 = a_3 = 1$ . Такий підхід можна обґрунтувати тим, що при приїзді першої пожежної автомашини, на якій знаходиться одна ланка, яка може після оперативного розгортання залучити до локалізації пожежі тільки

таку кількість засобів пожежогасіння. Максимальну кількість цих стволів відповідно  $b_1, b_2, b_3$  для ліквідації пожежі визначають за залежностями (5.50) – (5.52).

Наступним суттєвим обмеженням для забезпечення функції мети є тривалість вільного розвитку пожежі  $\tau_{в.з}$ . Мінімальне значення обмеження  $a_4$  на  $\tau_{в.з}$  можна визначити на підставі багато чисельного аналізу цього чинника за залежністю

$$a_4 = \frac{60Lk_n}{V_{сл}} + 20,5, \text{ хв} \quad (5.63)$$

а максимальне значення обмеження  $b_4$  на  $\tau_{в.з}$  приймаємо з урахуванням прогнозованого максимально можливого значення часу вільного горіння

$$b_4 = \frac{60Lk_n}{V_{сл}} + 29, \text{ хв.} \quad (5.64)$$

В процесі ліквідації пожежі кожного пожежного зобов'язують у випадку виникнення у зоні пожежі небезпечних для життєдіяльності чинників використовувати згідно із наказом № 1342 від 16.12.2011 року МНС України газодимозахисне спорядження та захисний одяг. Тому наступним обмеженням для ліквідатора пожежі є *відстань*  $l_q$  від фронту пожежі до пожежного зі стволом, яка б забезпечувала мінімальне значення дії на нього теплової радіації  $q$  в кВт/м<sup>2</sup>. Для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі необхідно використовувати апарат на стисненому повітрі SCBA ProffAir APS/4. Захист пожежного від теплової радіації необхідно виконувати за рахунок використання термозахисних костюмів «Індекс-1», «Індекс-3» та «Індекс-1200», які дозволяють працювати при температурі 200°C на протязі 15 хв, а термозахисний костюм «Індекс-1200» – при температурі 1200°C до 5 хв.

Для визначення значення  $q$  була отримана емпірична залежність на підставі аналізу результатів розрахунків за залежностями для визначення

густини теплового потоку за законом Стефана-Больцмана, температури факелу полум'я та площі пожежі. За результатами статистичної обробки результатів розрахунків отримана залежність

$$q = \frac{90\sqrt[3]{S_{II}}}{\sqrt{l_q^3}}, \text{ кВт/м}^2. \quad (5.65)$$

На значення  $l_q$  встановлюємо обмеження в залежності від мінімально можливої відстані пожежного від фронту пожежі ( $l_{q\min} = 5 \text{ м} = a_5$ ) та максимально можливої відстані  $l_{q\max} = b_5 = L_{\max} - h$ , яка залежить від максимальної довжини  $L_{\max}$  подачі пожежним стволом суцільного струменя вогнегасної рідини і глибини  $h$  подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі при її локалізації.

Після розгляду *всіх обмежень*, які впливають на розміщення сил і засобів для успішної локалізації і гасіння пожежі, переходимо до розгляду *тактичних дій* пожежно-рятувальних підрозділів для виконання цього процесу. Для гасіння пожеж на лісоскладах штабельного зберігання головним чином використовують воду [140]. Тому при прибутті пожежно-рятувальних підрозділів на об'єкт, де виникла пожежа, в процесі їх оперативного розгортання, в першу чергу необхідно поставити пожежні автоцистерни на найближчі вододжерела і розгорнути пожежні рукава від вододжерел до осередку пожежі, в тому числі від гідрантів кільцевої господарчо-пожежної магістралі високого тиску. При виникненні пожежі в місцях складу 1...13 (рис. 6.5) можливі наступні варіанти тактики локалізації пожежі

**Тактичний варіант 1.** У випадку виникнення пожежних ситуацій 1, 2, 3 і 4 (кутова пожежа  $90^\circ$ ) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по периметру фронту пожежі з обов'язковим виділенням стволів  $B$  на захист сусідніх штабелів від займання, які знаходяться в середині кварталу. Крім цього, необхідно враховувати напрям вітру. При напрямі вітру на квартал

лісоскладу, то вирішальний напрямок локалізації пожежі повинен бути спрямований проти вітру. При відсутності вітру сили пожежогасіння можуть бути розміщені рівномірно по периметру фронту пожежі.

**Тактичний варіант 2.** У випадку виникнення пожежних ситуацій 5...12 (кутова пожежа 180°) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по фронту пожежі з обов'язковим виділенням стволів *Б* на захист сусідніх штабелів від займання, які знаходяться в середині кварталу. Для спрощення оперативного розгортання половина пожежних автоцистерн повинна бути розміщена на продольних розривах складу на небезпечній відстані зі сторони переміщення фронту пожежі та з обов'язковою перекачкою до них води від вододжерел. При напрямі вітру на квартал лісоскладу, то вирішальний напрямок локалізації пожежі повинен бути спрямований проти вітру. При відсутності вітру сили пожежогасіння можуть бути розміщені рівномірно по периметру фронту пожежі.

**Тактичний варіант 3.** У випадку виникнення пожежної ситуації 13 (кругова пожежа 360°) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують за двома протилежно розміщеним фронтам пожежі, яка виникла в центральній частині складу лісоматеріалів, в яких відсутня пожежа. Захист сусідніх штабелів від займання виконують по всьому периметру пожежі. При цьому більша частина стволів *Б* повинна бути розміщена проти вітру. Вирішальний напрямок локалізації пожежі повинен бути спрямований проти вітру. Для зменшення тривалості часу оперативного розгортання пожежні автоцистерни повинні бути розміщені на продольних розривах складу на небезпечній відстані від фронтів пожежі та з обов'язковою перекачкою до них води від вододжерел. Більша частина пожежних автоцистерн повинна бути розміщена на складі на стороні фронту пожежі, який переміщується з напрямом вітру. При відсутності вітру сили пожежогасіння можуть бути розміщені рівномірно по периметру фронту пожежі.

Крім цього, при виконанні кожного тактичного варіанту необхідно в першу чергу збивати полум'я із зовнішніх поверхонь штабеля, щоб зменшити

вплив теплового випромінювання, з одночасною подачею суцільних струменів всередину деревини штабеля з торцевої сторони з метою їх проливання вогнегасною рідиною.

Після розгляду питань, які пов'язані з математичною постановкою задачі оптимізації, переходимо до **розроблення оптимізаційної математичної моделі** тактики локалізації і гасіння пожежі.

**Вхідні дані:** 1) координата пожежі  $I(x; y)$ , де  $I = 1, 2, \dots, 13$  – номер можливої пожежної ситуації; 2)  $V_{II}$  – лінійна швидкість розповсюдження полум'я пожежі, м/с; 3) швидкість вітру  $V_{\theta}$ , м/с; кут дії вітру  $\alpha_{\theta}$ , град; 4) тип ствола  $N_B$  та  $L_{\max}$ ; тип ствола  $N_A$  та  $L_{\max}$ ; 5) тип термозахисних костюмів і апаратів для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі, вибір яких залежить від густини теплового потоку  $q$ ; 6) тактичні варіанти розміщення сил і засобів локалізації і гасіння пожежі, кожен з яких вибирається в залежності від координати пожежі  $I(x; y)$ ; 7) значення обмежень  $a_i$  і  $b_i$ , які необхідно визначити заздалегідь; 8)  $[p]$  – допустиме значення імовірності для прийняття оптимального значення функції мети.

#### **Функція мети**

$$\tau_{\text{лок},i} + \tau_{\text{г},i} \Rightarrow \min; \quad (5.66)$$

#### **за критерієм**

$$B_{o,i} + B_{n,i} \Rightarrow \min; \quad (5.67)$$

#### **за обмеженнями**

$$a_1 \leq (N_A^A)_{\bar{a},3} \leq b_1; \quad (5.68)$$

$$a_2 \leq (N_A)_{\theta,i} \leq b_2; \quad (5.69)$$

$$a_3 \leq (N_A^C)_{\bar{a},3} \leq b_3; \quad (5.70)$$

$$a_4 \leq \tau_{\theta,i} \leq b_4; \quad (5.71)$$

$$a_5 \leq l_{qi} \leq b_5; \quad (5.72)$$

$$p_i \geq [p], \quad (5.73)$$

де  $p_i$  – імовірність попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків ( $p_i = k/N$ , де  $k$  – кількість циклів роботи програми, при яких досліджувальні точки попали в область допустимих розв'язків;  $N$  – загальна кількість циклів роботи програми);

$[p]$  – допустиме значення імовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення.

Для розв’язування оптимізаційної моделі скористуємося методом Монте-Карло. Область допустимих розв’язків, яка визначається обмеженнями (5.68)...(5.72), оточують  $m$ -мірним паралелепіпедом, в якому проводимо дослідження. Поставлену задачу краще всього розв’язувати з використанням ПЕОМ. За допомогою генератора комп’ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$  в інтервалі  $0 \dots 1$ . Для перетворення псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$ , які рівномірно розподілені в інтервалі  $0 \dots 1$ , до значень  $(N_A^A)_{\partial.i}$ ,  $(N_A)_{\partial.i}$ ,  $(N_A^C)_{\partial.i}$ ,  $\tau_{в.г.i}$  та  $l_{qi}$  використовуємо залежності виду, наприклад, як для  $l_{qi}$

$$l_{qi} = a_5 + \mu_{5i}(b_5 - a_5),$$

де  $\mu_{5i}$  – псевдовипадкове число для визначення чинника  $l_{qi}$  на певному  $i$ -тому циклі розрахунку.

В процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначаються значення  $\tau_{лок.i}$  і  $\tau_{г.i}$  за залежностями (5.37) та критеріїв  $B_{o.i}$  і  $B_{n.i}$ , які перевіряються зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконуються до тих пір, поки буде виконана умова (5.73). Після завершення роботи програми на друк видаються такі дані:  $S_{Pi}$  на час початку локалізації;  $\tau_{в.г.i}$ ,  $V_{Пв}$ ,  $S_{лок.i}$ ,  $\tau_{лок.i}$  і  $\tau_{г.i}$ , тип і кількість пожежних стволів для гасіння та захисту (окремо)  $(N_A^A)_{\partial.i}$ ,  $(N_A)_{\partial.i}$ ,  $(N_A^C)_{\partial.i}$ ,  $l_{qi}$ ,  $q_i$ ,  $p_i$ ; тип апарату для захисту органів дихання та зору; тип термозахисного одягу; тактичний варіант локалізації і гасіння пожежі.

### **5.3. Оцінка ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів, які не горять і знаходяться перед фронтом пожежі**

Для оцінки ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів, які не горять і знаходяться перед фронтом пожежі, необхідно

встановити взаємодію водного струменя з поверхнями штабеля, вплив інтенсивності подачі води на охолодження штабеля та на ефективність використання води при охолодженні поверхонь штабелів. При розгляді цього параграфу використано результати наукової роботи д.т.н., проф. О.Є. Басманова [18].

Перед розв'язуванням поставлених задач розглянемо основні види бокових поверхонь штабелів лісоматеріалів, які зберігаються на відкритих складах. Бокові поверхні штабеля круглого лісоматеріалу зображені на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Фрагмент поверхонь штабеля круглого лісоматеріалу

Штабелі пиломатеріалів можуть бути укладені двома способами: 1) з утворенням зазорів між шарами пиломатеріалів (рис. 5.6, *a*); 2) без зазорів між шарами пиломатеріалів (рис. 5.6, *б*).



Рис. 5.6. Фрагменти поверхонь штабелів пиломатеріалів: *a* – з утворенням зазорів між шарами; *б* – без утворення зазорів (торцева поверхня штабеля)

При охолодженні поверхонь штабеля суцільний струмінь води, який виходить із насадки ствола, розпилюється і падає на бокову поверхню у диспергированному вигляді. Після зіткнення з поверхнею штабеля вода розбризкується в різні сторони, частково заходить в середину штабеля, а залишок води стікає вниз по боковій поверхні штабеля. Наближено будемо вважати, що вода при стіканні утворює полосу шириною  $b_{ох}$ , яка і охолоджує



зовнішню поверхню деревини штабеля. Зовнішній нагляд за сходженням полоси води показав, що її ширина коливається в межах 0,7...1,2 м. Для проведення розрахунків приймаємо ширину водної полоси стікання для охолодження поверхонь штабеля  $b_{ox} = 0,8$  м.

**Ставиться задача визначити довжину шляху водної полоси** при її опусканні з найвищої точки штабеля  $h$  до початку кипіння, тобто значення  $u_k$ . Для цього необхідно визначити товщину водяної полоси  $\delta$ , швидкість її опускання  $v_{e.n}$  та коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_m$ .

Товщину водяної полоси  $\delta$  визначаємо за залежністю [18]

$$\delta = 0,3076 \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3} Re^{0,6}, \quad (5.74)$$

де  $v$  – кінематична в'язкість води при температурі 20° С;  $v = 1,006 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;

$g$  – прискорення вільного падіння;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$Re$  – число Рейнольдса; для ствола  $A$   $Re = 9000$ , для ствола  $B$   $Re = 4226$ .

Після підстановки числових значень в залежність (5.74) товщина плівки знаходиться в межах  $\delta = 2,2...3,5$  мм.

Швидкість опускання водної полоси визначаємо за залежністю [18]

$$v_{e.n} = \frac{V_c k_e}{b_{ox} \delta}, \quad (5.75)$$

де  $V_c$  – розхід води стволом, м<sup>3</sup>/с;

$k_e$  – коефіцієнт, який враховує ефективність використання води, тобто яка частина води іде на утворення водяної полоси (попередньо приймаємо  $k_e = 0,5$ ).

Після підстановлення в залежність (5.75) числових значень отримуємо  $v_{e.n} = 0,77...1,54$  м/с.

Коефіцієнт тепловіддачі визначаємо за залежністю [18]

$$\alpha_m = 0,0946\lambda \left( \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} \text{Re}^{0,2} \text{Pr}^{0,4}, \quad (5.76)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності для води при температурі 20° С;  $\lambda = 5990$  Вт/м·К;

$\text{Pr}$  – число Прандтля (для води при температурі 20° С  $\text{Pr} = 7,02$ ).

Після підстановлення в залежність (5.76) числових значень отримуємо  $\alpha_m = 19,5$  кВт/м<sup>2</sup>К для ствола А і 14,8 кВт/м<sup>2</sup>К для ствола Б.

Довжину шляху водної полоси до початку кипіння визначаємо за залежністю [18]

$$y_k = v_{e,n} \frac{\delta \rho c_p}{\alpha_m} \ln \frac{T_c - T_0}{T_c - T_k}, \quad (5.77)$$

$\rho$  - густина води, кг/м<sup>3</sup>; ( $\rho = 998,2$  кг/м<sup>3</sup>);

$c_p$  – теплоємність води, кДж/кг·К ( $c_p = 4,183$  кДж/кг·К);

$T_c$  – температура зовнішньої поверхні деревини штабеля, К;

$T_0$  – температура зовнішнього середовища, К;

$T_k$  – температура кипіння води, К.

Після підстановлення в залежність (5.76) числових значень отримуємо  $y_k = 0,8$  м при  $T_c = 150^\circ\text{C}$  та  $y_k = 0,5$  м при  $T_c = 200^\circ\text{C}$  при охолодженні стволом В.

***Вплив інтенсивності подачі води на охолодження бокових поверхонь штабеля***, значення якої можна визначити за залежністю

$$I_c = \frac{V_c k_e}{b_{ox}}. \quad (5.78)$$

Аналізуючи залежність (5.78) можна зауважити, що при збільшенні подачі стволами води на бокові поверхні штабелів і при збільшенні коефіцієнта, який враховує ефективність використання води, ефективність

охолодження зростає. Це можна пояснити тим, що збільшується передача кількості тепла більшій кількості стікаючої води. Тому ставиться задача встановити можливість збільшити в першу чергу значення коефіцієнта  $k_e$  до максимально можливого значення за рахунок визначення оптимального кута напрямку подачі суцільного струменя ствола на охолодження бокових поверхонь штабеля.

**Ефективність використання води при охолодженні бокових поверхонь штабелів.** В процесі охолодження вода, яка направлена зі ствола на бокові поверхні штабеля, частково входить в середину штабеля, частково відскакує від поверхні, а залишок стікає по боковій поверхні штабеля і охолоджує її. Ставиться задача визначити оптимальний кут напрямку подачі струменя води на бокову поверхню штабеля, який би забезпечив найбільше значення коефіцієнта  $k_e$ . Для розв'язування цієї задачі був виконаний комплекс експериментальних досліджень з використанням штабелів круглого лісоматеріалу та пиломатеріалів. Подачу води на поверхню штабеля виконували за допомогою ручного ствола  $B$  з насадкою 13 мм при напорі 0,4 МПа з відстані  $l_c = 5$  м. Для збирання води, яка стікала з бокової поверхні штабеля і 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 на протязі часу  $\tau = 20$  с до 70 л. Схема проведення експериментальних досліджень зображена на рис. 5.7.

Виконання експерименту полягає в наступному. Струмінь води  $3$  від ствола  $4$  ударяється об вертикальну торцеву поверхню штабеля  $1$ . Вода, яка стікає по поверхні штабеля, розміщується в ємності  $2$  та частково входить в щілини між лісоматеріалом штабеля, а вся інша розлітається навколо ємності і штабеля. Вода, яка вийшла із пожежного ствола об'ємом  $V_c$  ( $V_c = 3,7 \cdot \tau$ , л), більша за об'ємом води, що пішла на охолодження стінки штабеля, тобто її ефективного об'єму  $V_e$ , який збирається в ємності  $2$ .

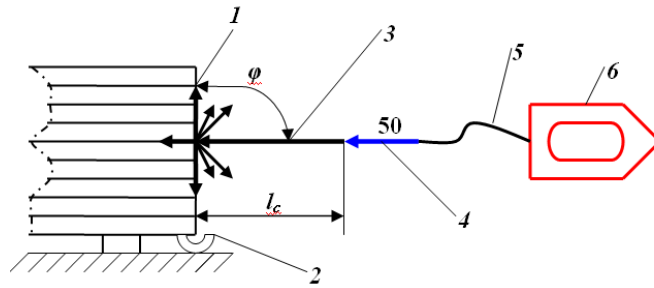


Рис. 5.7. Схема проведення експериментальних досліджень для визначення коефіцієнта ефективності використання води для охолодження: **1** – торець штабеля пиломатеріалів (рис. 6.7, б) (вид збоку); **2** – ємність для збирання води; **3** – суцільний струмінь води; **4** – пожежний ствол; **5** – пожежний рукав; **6** – пожежна автоцистерна

Тоді коефіцієнт ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів буде визначатися так

$$k_e = \frac{V_e}{V_c}. \quad (5.79)$$

Визначення коефіцієнта ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів будемо виконувати при різних кутах  $\varphi$  подачі струменя на бокову поверхню штабеля, а також з урахуванням штабелів круглого лісоматеріалу та штабелів пиломатеріалів без зазорів між шарами деревини і з зазорами. Крім того будемо визначати значення  $k_e$  для кожного виду лісоматеріалу як з торцевої сторони штабеля, так і зі сторони штабеля, на якій лісоматеріал розміщений вздовж осі своєї конструктивної форми.

Досліди проводили при значеннях кута  $\varphi = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ . Кількість повторень кожного дослідів 3 рази. Тривалість подачі суцільного струменя із пожежного ствола на кожному досліді  $\tau = 10$  с. Об'єм води із ємності **2** (рис. 6.8) вимірювався за допомогою тариованих відер.

За результатами кожного з 3 експериментів визначалося середнє значення, яке використовувалося для побудови графічних залежностей та їх аналізу.

Результати досліджень для визначення впливу кута  $\varphi$  подачі суцільного струменя на коефіцієнт  $k_e$  ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів круглого лісоматеріалу зображено на рис. 5.8.

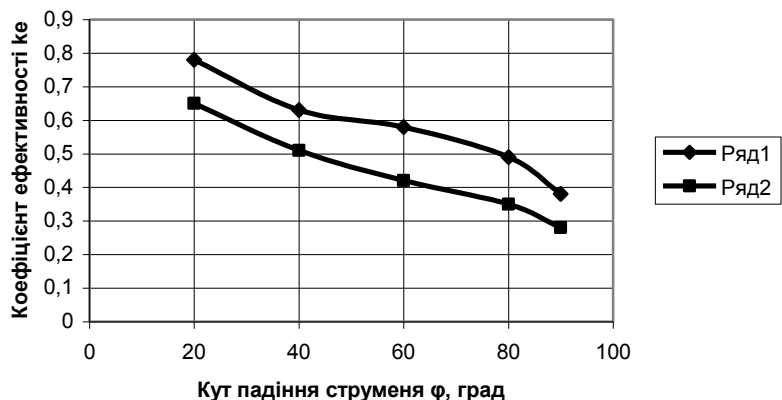


Рис. 5.8. Вплив кута  $\varphi$  подачі суцільного струменя на коефіцієнт  $k_e$  ефективності використання води при охолодженні бокових поверхонь штабеля круглого лісоматеріалу: ряд 1 – з торця штабеля; ряд 2 – вздовж довгої осі лісоматеріалу

Результати аналізу отриманих експериментальних досліджень показують, що найбільша ефективність використання води при охолодженні бокових поверхонь штабеля круглого лісоматеріалу була досягнута при розміщенні ствола під кутом  $\varphi = 20^\circ$  до бічної поверхні штабеля. Більше значення коефіцієнта  $k_e = 0,78$  при розміщенні ствола під кутом  $\varphi = 20^\circ$  отримано при охолодженні торцевої поверхні штабеля і  $k_e = 0,65$  – при охолодженні поверхні штабеля вздовж довгої осі лісоматеріалу. Різниця в значеннях коефіцієнтів ефективності використання води пояснюється тим, що при охолодженні торцевої поверхні штабеля плоскі поверхні зрізу круглого лісоматеріалу утворюють кращі умови для створення водяної полоси. При охолодженні бічної поверхні штабеля вздовж довгої осі лісоматеріалу його конструктивна особливість сприяє умовам для розливу води в середину штабеля, що зменшує злив води по водяній полосі.

Наступні дослідження проводилися на штабелях пиломатеріалів. Результати цих досліджень для визначення впливу кута  $\varphi$  подачі суцільного струменя на коефіцієнт  $k_e$  ефективності використання води для захисту від

нагрівання штабелів пиломатеріалів, які складені без утворення зазорів між шарами деревини, зображені на рис. 5.9.

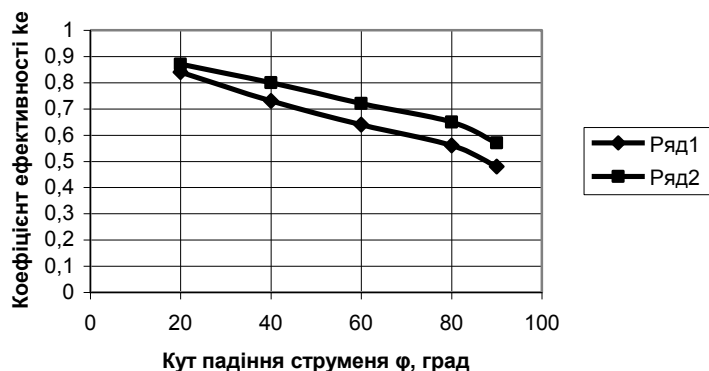


Рис. 5.9. Вплив кута  $\varphi$  подачі суцільного струменя на коефіцієнт  $k_e$  ефективності використання води при охолодженні бокових поверхонь штабеля пиломатеріалів, які складені без утворення зазорів між шарами деревини: ряд 1 – з торця штабеля; ряд 2 – вздовж довгої осі пиломатеріалу

Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень показує, що найбільше значення коефіцієнта  $k_e$  відповідає куту між струменем води і бічною поверхнею штабеля  $\varphi = 20^\circ$ . Це можна пояснити тим, що при зменшенні кута  $\varphi$  виникають кращі умови для переміщення води по поверхні за рахунок ковзання з одночасним зменшенням її розбризкування. Одночасно значення коефіцієнта  $k_e$  є більшим при охолодженні штабеля зі сторони довгої осі пиломатеріалу. Пояснення такого явища полягає в тому, що на торцевій поверхні знаходиться більша кількість щілин для проходження води в середину штабеля (рис. 5.6, б) ніж на стороні штабеля довгої осі пиломатеріалу.

При дослідженні процесу охолодження штабелів пиломатеріалу, в яких деревина укладена із зазорами між її шарами (рис. 5.6, а), було встановлено, що значення коефіцієнта  $k_e$  є меншим порівняно із штабелями, які укладені без зазорів між шарами деревини (рис. 5.10). Пояснення цього результату полягає в тому, що наявність зазорів дає можливість значній кількості води поступати в середину штабеля.

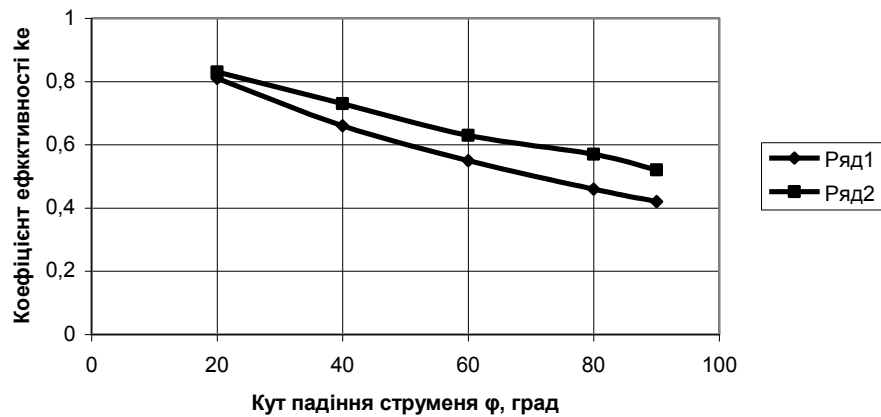


Рис. 5.10. Вплив кута  $\varphi$  подачі суцільного струменя на коефіцієнт  $k_e$  ефективності використання води при охолодженні бокових поверхонь штабеля пиломатеріалів, які складені з утворенням зазорів між шарами деревини: ряд 1 – з торця штабеля; ряд 2 – вздовж довгої осі пиломатеріалу

Підсумовуючи отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень приходимо до висновку, що для забезпечення якісного охолодження поверхонь штабелів, які розміщені зі сторони фронту пожежі, необхідно виконувати подачу суцільного струменя води під кутом не більше  $20^\circ$  до поверхні штабеля у вигляді коливних маятникових рухів. При цьому охолодження необхідно починати з верхньої частини штабеля і по всій довжині його сторони, а також враховувати той чинник, що кипіння стікаючої водяної полоси починається на довжині її шляху в межах  $0,5 \dots 0,8$  м.

#### **5.4. Алгоритми розв'язку задач по визначенню оптимальних тактичних методів локалізації та гасіння пожежі**

##### **5.4.1. Алгоритм тактики локалізації та гасіння пожежі в закритих цехах та чисельне дослідження тривалості ліквідації пожежі**

Для розроблення блок-схеми алгоритму локалізації та гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху розглянемо можливі пожежні ситуації та види пожеж, які можуть виникнути в процесі виконання всіх планових робіт. В

цьому випадку скористуємося схемою приміщення цеху, яка зображена на рис. 6.1, але для зручності розгляду цього питання продублюємо рис. 6.1 і зобразимо його на рис. 5.11.

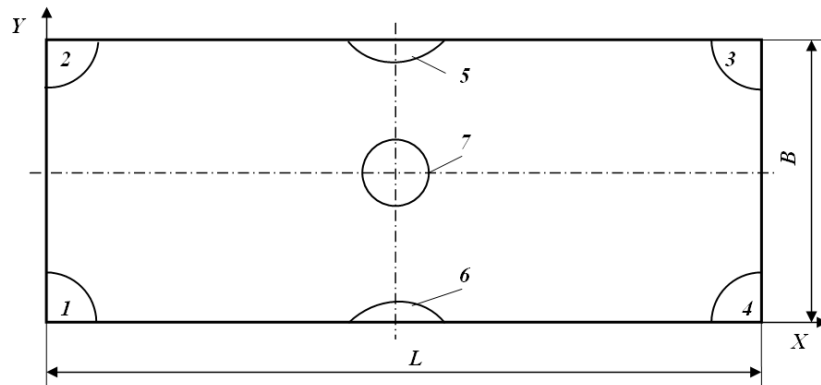


Рис. 5.11 – Схема приміщення цеху деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями і формами площі пожежі:  
1, 2, 3, 4 – кутова форма ( $90^\circ$ )  $\alpha = 0,785$  рад; 5, 6 – кутова форма ( $180^\circ$ )  $\alpha = 1,57$  рад; 7 – кругова ( $360^\circ$ )  $\alpha = 3,14$  рад

Розмістивши приміщення цеху в системі координат  $XY$  (рис. 5.11), визначимо координати розміщення кожної пожежної ситуації:  $1(0; 0)$ ;  $2(0; B)$ ;  $3(L; B)$ ;  $4(L; 0)$ ;  $5(0,5L; B)$ ;  $6(0,5L; 0)$ ;  $7(0,5L; 0,5B)$ . Крім цього, необхідно також врахувати напрям і швидкість вітру на приміщення цеху (рис. 5.2) і значення аеродинамічного коефіцієнта (табл. 5.2). Після цього переходимо до визначення вхідних даних.

**Вхідні дані:** 1) координата пожежі  $I(x; y)$ , де  $I = 1, 2, \dots, 7$  – номер можливої пожежної ситуації; 2) наявність пожежних відсіків  $\xi$  (у випадку відсутності пожежних відсіків  $\xi = 1$ ; при наявності в цеху пожежних відсіків  $\xi = 1,8$ ); 3)  $v_d$  – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/с; 4) швидкість вітру  $V_в$ , м/с; кут дії вітру  $\alpha_в$ , град; номер ділянки цеху, на якій виникла пожежа, з надлишковим тиском від вітру або розрядженням; 5) тип ствола  $N_B$  та  $L_{\max}$ ; тип ствола  $N_A$  та  $L_{\max}$  ( $L_{\max} = 30$  м); 6) тип термозахисних костюмів і апаратів для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі, вибір яких залежить від  $q_{\min}$  і часу тривалості вільного розвитку пожежі; 7) тактичні варіанти розміщення сил і засобів локалізації і гасіння пожежі, кожен з яких вибирається в залежності від



координати пожежі  $I(x; y)$  в цеху; 8) значення обмежень  $a_i$  і  $b_i$ , які необхідно визначити заздалегідь; 9)  $[p]$  – допустиме значення імовірності для прийняття оптимального значення функції мети.

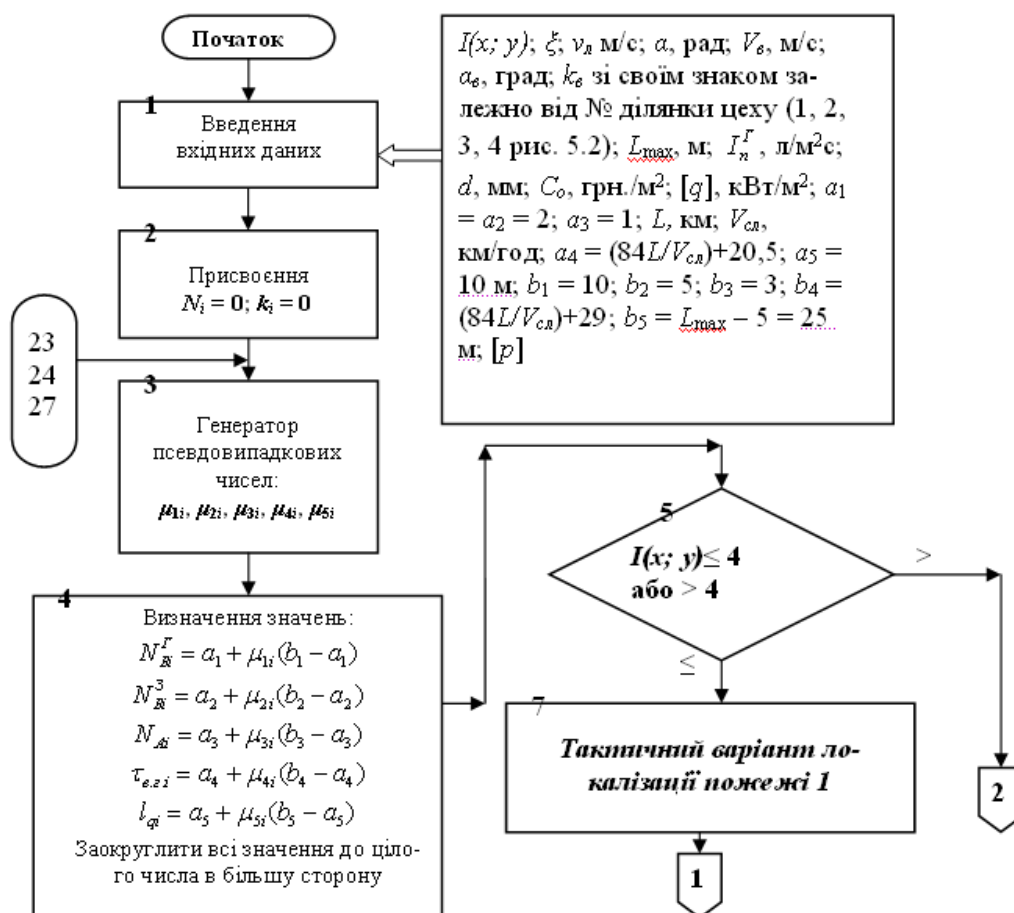


Рис. 5.12. Початок блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

**Блок 1.** Введення вхідних даних (рис. 5.12).

**Блок 2.** Присвоєння  $N_i = 0; k_i = 0$ .

**Блок 3.** Генератор псевдовипадкових чисел.

**Блок 4.** Визначення значень кількості стволів, тривалості вільного горіння та відстані пожежного від фронту пожежі.

**Блок 5, 7 та 6, 8, 9** (рис. 5.13) призначені для визначення тактичного варіанту локалізації пожежі.

**Блок 10...16** призначені для визначення швидкості розповсюдження пожежі  $V_{\Pi}$  в приміщенні цеху (рис. 5.13).

**Блок 17.** Присвоєння номера циклу роботи програми (рис.5.14).

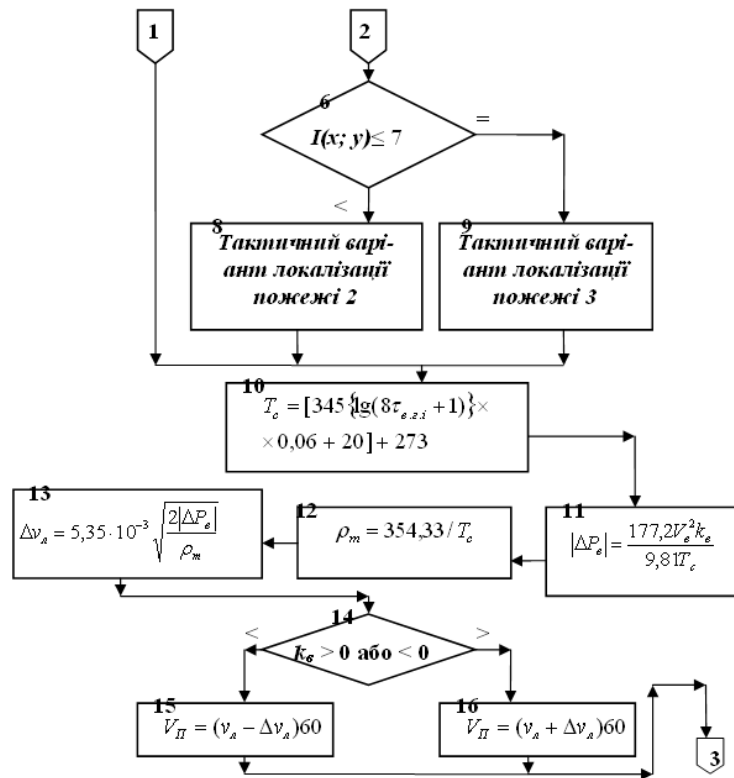


Рис. 5.13. Продовження блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

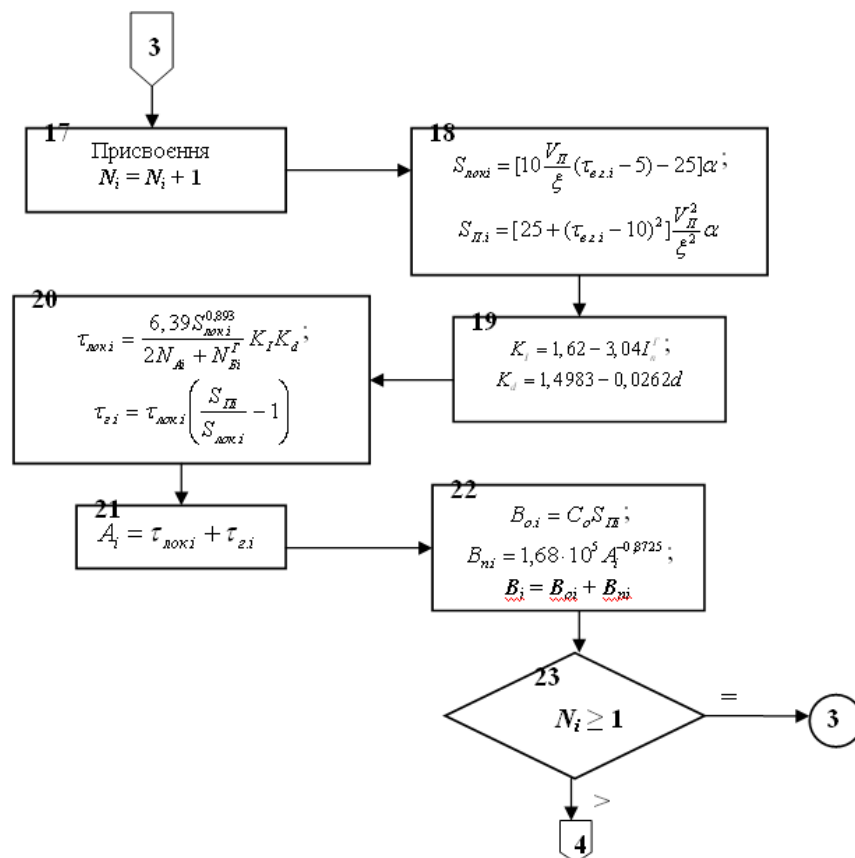


Рис. 5.14. Продовження блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

Блок 18. Визначається площа локалізації і пожежі.

Блок 19, 20. Визначається тривалість локалізації і гасіння пожежі.

Блок 21. Визначається функція мети.

Блок 22. Визначаються збитки об'єкта та витрати пожежно-рятувального підрозділу на ліквідацію пожежі.

Блок 23. Визначається номер циклу роботи програми.

Блок 24. Виконується перевірка функції мети і критерія оптимізації

(рис. 5.15).

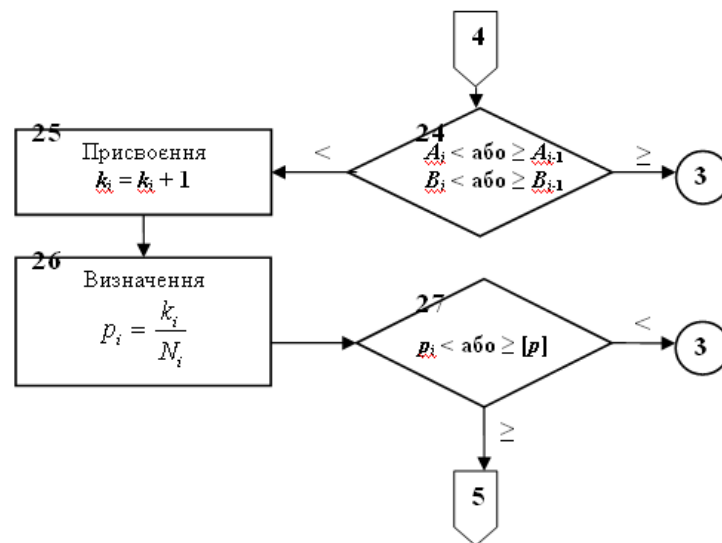


Рис. 5.15. Продовження блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

Блок 25. Виконується присвоєння номера цикла, який пройшов в область допустимих розв'язків.

Блок 26. Визначається значення імовірності попадання досліджуваного значення в область допустимих розв'язків.

Блок 27. Перевіряється значення імовірності з допустимим. При забезпеченні умови виконується перехід до блока 28 (рис. 5.16).

Блок 28. Визначається густина теплового потоку.

Блок 29, 30, 31. Виконується вибір захисного одягу пожежному.

Блок 32. Роздрук результатів розв'язування оптимізаційної задачі.

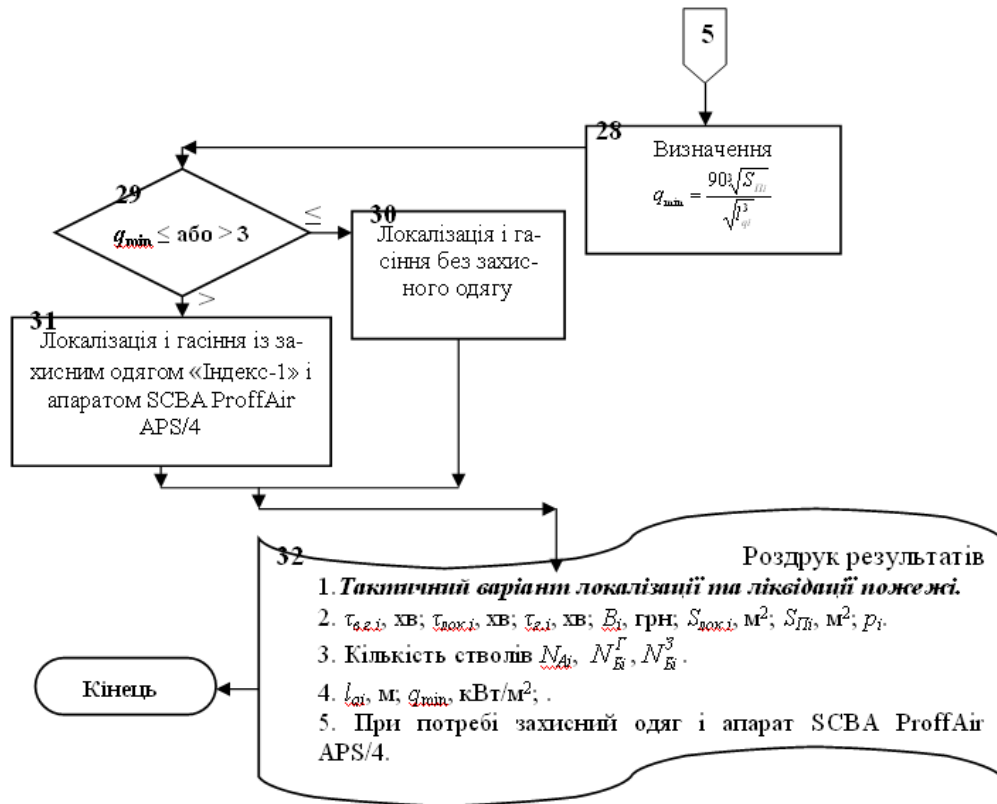


Рис. 5.16. Закінчення блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

Для реалізації оптимізаційної моделі був розроблений для ПЕОМ пакет прикладних програм на мові С# для роботи в середовищі Windows XP (додаток 5). Час роботи ПЕОМ становив 5-7 с для 5 тисяч випробувань ( $N_i$  – циклів) при імовірності попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв’язків  $p = 0,9 \dots 0,94$ . Робоче вікно програми зображено на рис. 5.17.

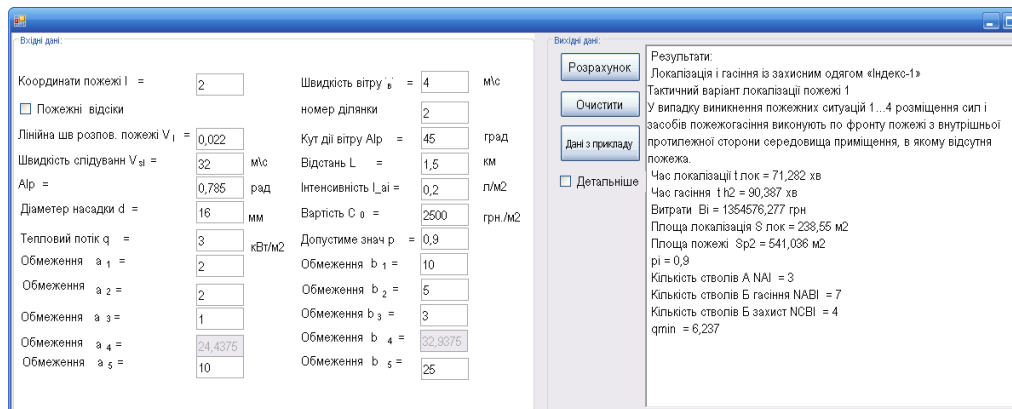


Рис. 5.17. Робоче вікно програми для визначення тактичного варіанту локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

Після розгляду блок-схеми алгоритму розв'язку задачі по оптимізації тактики ліквідації пожежі в закритому приміщенні цеху деревообробного підприємства виконаємо з використанням програмного забезпечення дослідження тривалості ліквідації пожежі.

**Приклад.** В деревообробному цеху виникла кутова пожежа з координатою  $2(0; B)$  (рис. 5.11); в цеху розміщені пожежні відсіки  $\xi = 1,8$ ; лінійна швидкість розповсюдження пожежі  $v_l = 0,022$  м/с;  $\alpha = 0,785$  рад; швидкість вітру  $V_\epsilon = 4$  м/с; напрям вітру на будівлю цеху  $\alpha_\epsilon = 45^\circ$ ; коефіцієнт, який враховує вплив вітру на осередок приміщення цеху  $k_\epsilon = 0,36$ ; максимальна довжина суцільного струменя води з пожежного ствола  $L_{\max} = 30$  м; інтенсивність подачі води на ліквідацію пожежі  $I_n^r = 0,2$  л/м<sup>2</sup>с; діаметр насадки ствола  $d = 16$  мм; вартість одиниці площі об'єкта  $C_o = 2500$  грн./м<sup>2</sup>; допустиме значення густини теплового потоку  $[q] = 3$  кВт/м<sup>2</sup>;  $a_1 = a_2 = 2$ ;  $a_3 = 1$ ; відстань від пожежного депо до об'єкта  $L = 1,5$  км; швидкість слідування  $V_{сл} = 32$  км/год;  $a_4 = 24,4$  хв;  $a_5 = 10$  м;  $b_1 = 10$ ;  $b_2 = 5$ ;  $b_3 = 3$ ;  $b_4 = 32,9$  хв;  $b_5 = 25$  м;  $[p] = 0,9$ .

Після введення вхідних даних в робоче вікно програми та її запуску був отриманий наступний результат (рис. 6.19).

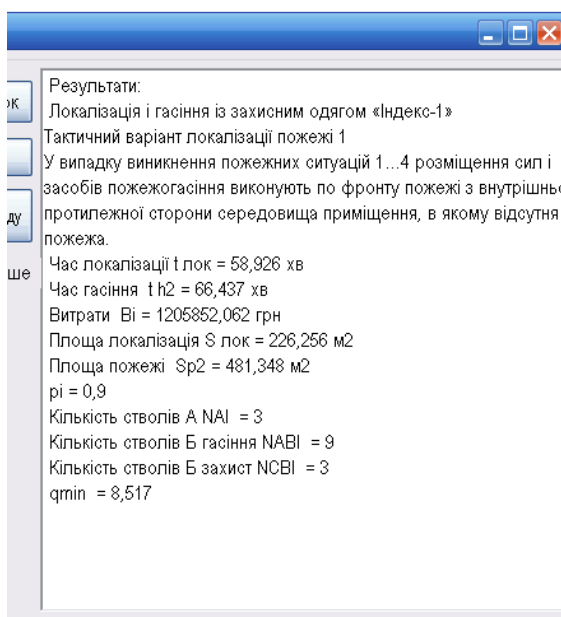


Рис. 5.18. Роздрук оптимального результату для проведення локалізації і гасіння пожежі в цеху деревообробного підприємства

### 5.4.2. Алгоритм тактики локалізації та гасіння пожежі на відкритих складах та чисельне дослідження тривалості ліквідації пожежі

Для розроблення блок-схеми алгоритму локалізації та гасіння пожежі на відкритих складах лісоматеріалів скористуємося рис. 5.4, на якому зображена схема квартала склада лісоматеріалів деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями. Розроблення блок-схеми алгоритму починаємо з блоку для введення вхідних даних (рис. 5.19).

**Вхідні дані:**  $I(x; y)$ ;  $\alpha$ , рад;  $V_{II}$ , м/с;  $\alpha_6$ , град;  $V_6$ , м/с;  $I_n^r$ , л/м<sup>2</sup>с;  $d$ , мм; тип ствола  $N_B$  та  $L_{\max}$ , м; тип ствола  $N_A$  та  $L_{\max}$ , м;  $C_o$ , грн./м<sup>2</sup>;  $C_n$ , грн/хв;  $\tau_{o.o} = \tau_{3.6} = 1$  хв;  $\tau_{3.c} = 3$  хв;  $L$ , км;  $V_{cl}$ , км/ГОД;  $\tau_{cl} = (84L/V_{cl})$ , хв;  $\tau_{роз} = 7$  хв;  $a_1 = a_2 = a_3 = 1$ ;  $a_4 = (84L/V_{cl}) + 20,5$ , хв;  $a_5 = 5$  м;  $b_4 = (84L/V_{cl}) + 29$ , хв;  $b_5 = L_{\max} - 5$ , м;  $h_2$ , м;  $b$ , м;  $l$ , м;  $h$ , м;  $R_c(\tau)$ ; кількість працюючих на кварталі складу  $N_n$ ;  $[p]$ .

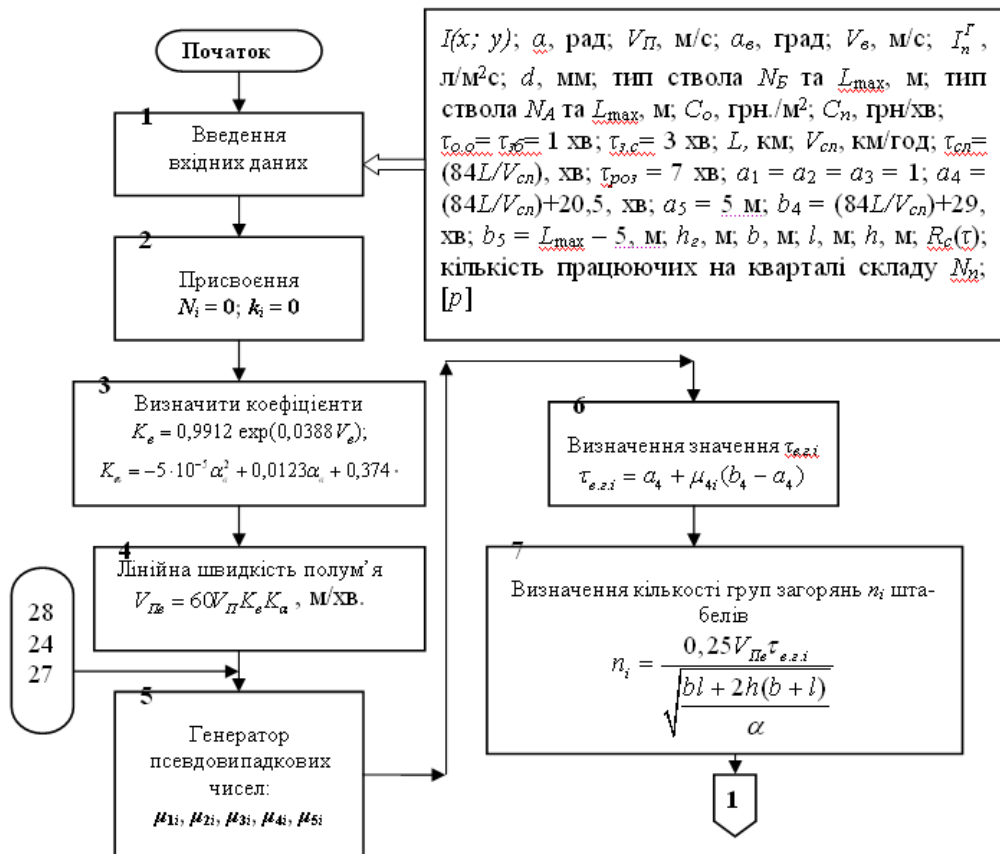


Рис. 5.19. Блок-схема алгоритму для введення вхідних даних, визначення лінійної швидкості розповсюдження пожежі, генерації псевдовипадкових чисел, визначення значення  $\tau_{6.2}$  та визначення кількості груп загорянь штабелів

Продовження блок-схеми алгоритма зображено на рис. 5.20.

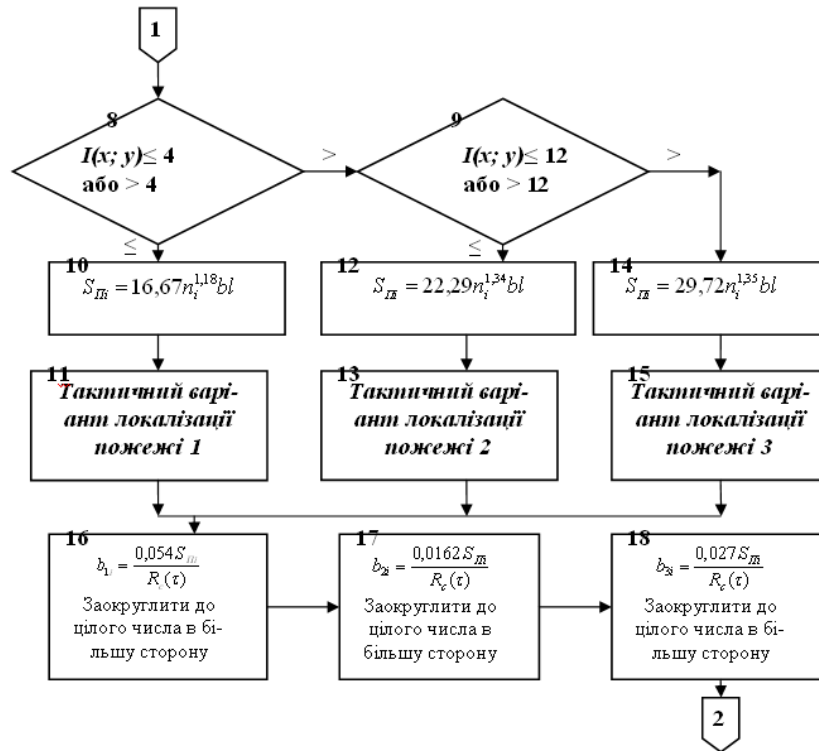


Рис. 5.20. Продовження блок-схеми алгоритму для розрахунку площі пожежі, вибору тактичного варіанта локалізації пожежі та обмежень

Після визначення значень обмежень переходимо до визначення кількості засобів пожежогасіння, відділень, пожежної техніки, площі та тривалості локалізації і гасіння пожежі (рис. 5.21).

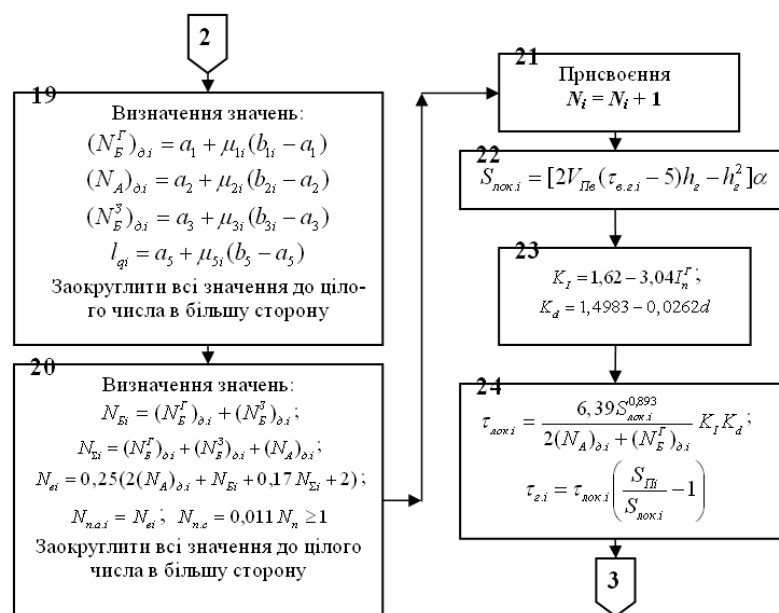


Рис. 5.21. Блок-схема алгоритму для визначення кількості пожежних стовпів, відділень, пожежних автомобілів та часу локалізації і гасіння пожежі

Визначення функції мети, збитків об'єкта від пожежі, витрат ПРП на ліквідацію пожежі, а також порівняння функції мети та критерія оптимізації з їх значеннями на попередньому циклі зображено на рис. 5.22.

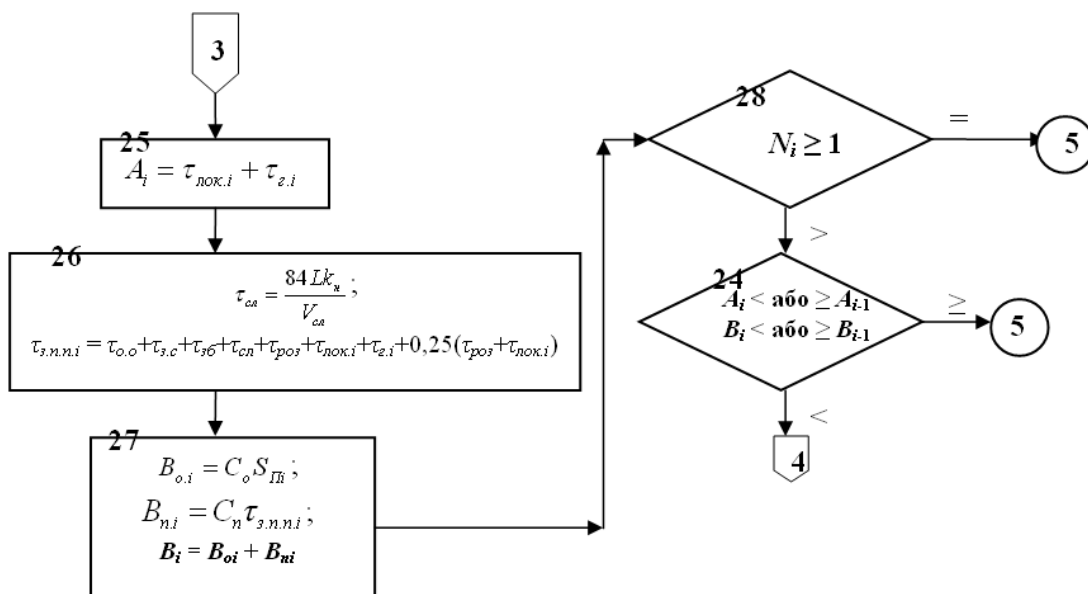


Рис. 5.22. Блок-схема алгоритму для визначення збитків і витрат, які пов'язані з пожежею

Визначення імовірності попадання досліджуваної точки в область допустимих розв'язків, вибір захисного одягу та роздрук результатів зображено на рис. 5.23.

Для реалізації оптимізаційної моделі був розроблений для ПЕОМ пакет прикладних програм на мові С# для роботи в середовищі Windows XP (додаток 6). Час роботи ПЕОМ становив 5-7 с для 5 тисяч випробувань ( $N_i$  – циклів) при імовірності попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків  $p = 0,9 \dots 0,94$ . Робоче вікно програми зображено на рис. 5.24.

Після розгляду блок-схеми алгоритму розв'язку задачі по оптимізації тактики ліквідації пожежі на відкритих складах лісоматеріалів деревообробного підприємства виконаємо з використанням програмного забезпечення дослідження тривалості ліквідації пожежі.

**Приклад.** Вибрати оптимальний варіант тактики гасіння пожежі на кварталі складу круглих лісоматеріалів.



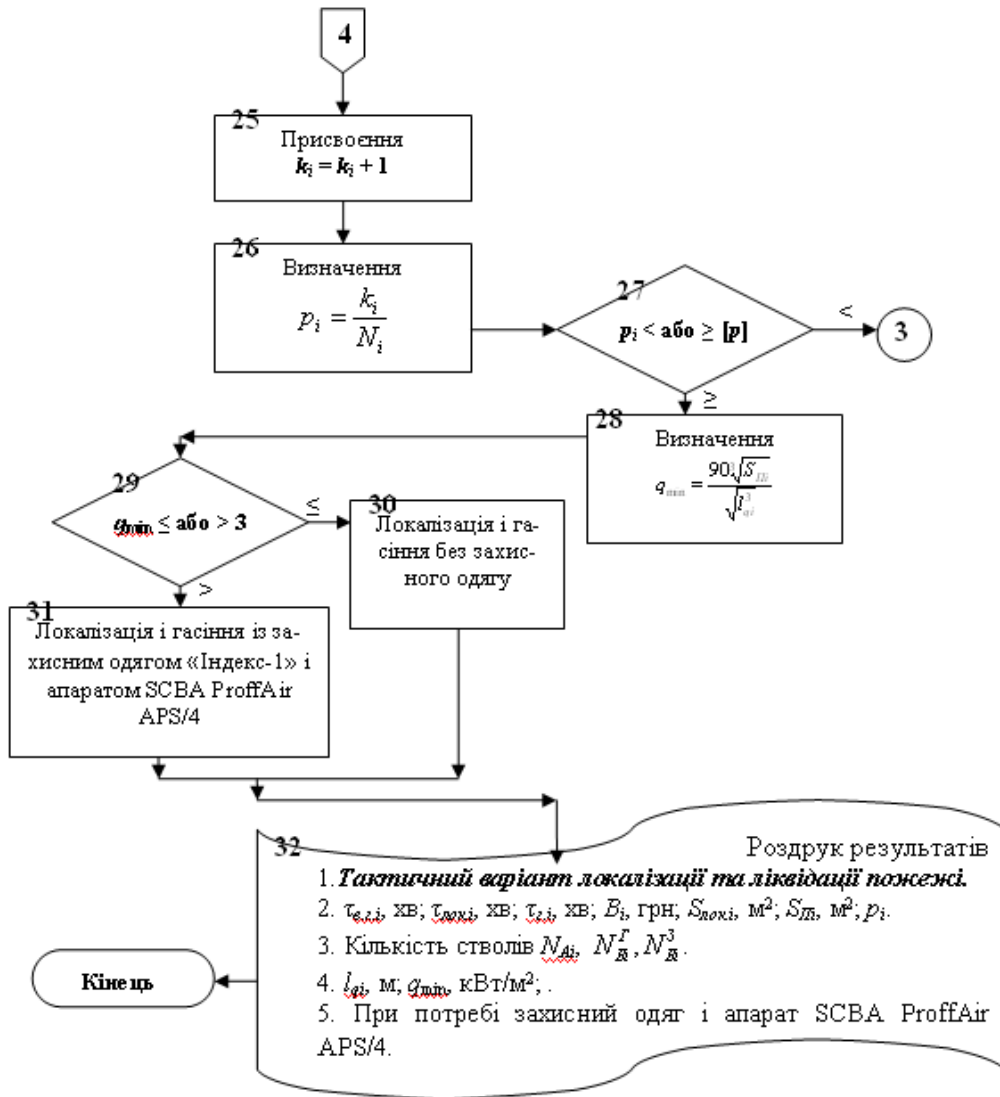


Рис. 5.23. Блок-схема алгоритму визначення оптимальної тактики гасіння пожеж на лісоскладах штабельного зберігання (закінчення)

Вхідні дані:

Координати пожежі I =	2	Тип ствола Б Nb =	РСП-50
$\alpha =$	0.785 рад	Довжина струменя ст. Б Lmaxb =	30 м
Лін. шв. розпов. пожежі $V_p =$	0.0585 м/с	Тип ствола А Na =	РСП-70
Кут дії вітру AlpB =	270 град	Довжина струменя ст. А Lmaxa =	30 м
Швидкість вітру $V_v =$	4 м/с	Вартість $C_0 =$	2200 грн/м <sup>2</sup>
Інтенсивність пожежогасіння $l_{ai} =$	0.2 л/м <sup>2</sup> с	Вартість $C_n =$	67 грн/хв
Діаметр насадка d =	16 мм	Швидкість слідування $V_{ш} =$	32 км/год
Відстань L =	2 км	Тривалість розгортання $t_{роз} =$	7 хв
Тривалість слідування $T_{сп} =$	5.25 хв	Глибина гасіння $h_z =$	5 м
b =	6 м	Мін. відстань від фронту пожежі l(m) =	6.5 м
h =	6 м	Імовірність безвідмовної роботи $R_c =$	0.84
Загальна кількість працюючих N =	12	Допустиме значення імовірності p =	0.5

Вивідні дані:

Локалізація гасіння без захисного одягу

Результати

Тактичний варіант локалізації пожежі 1

У випадку виникнення пожежної ситуації 1, 2, 3 і 4 (кутова пожежа 90°) розміщення сил і засобів пожежогасіння змонтує по периметру фронту пожежі з обох боків виділенім стовпі В на зовнішній стороні від займання, які знаходяться в середині кварталу. Крім цього, необхідно враховувати напрям вітру. При напрямі вітру на квартал лісо-складу, то вищий напрямком локалізації пожежі повинні бути спрямовані проти вітру. При відсутності вітру сили пожежогасіння можуть бути розміщені рівномірно по периметру фронту пожежі.

2. Тривалість слідування  $l_{cl} = 7.35$  хв
- Тривалість вільного горіння  $T_{сп} = 5.25$  хв
- Витрати  $Vol = 83446$  грн
- $W = 37288.3448529153$
- Площа локалізації  $S_{лок} = 15$  м<sup>2</sup>
- Площа пожежі  $S_{pi} = 37.93$  м<sup>2</sup>
- Імовірність  $p_i = 0.5$
- Стволи на гасіння РСП-70 1 шт
- Стволи на гасіння РСП-50 3 шт
- Кількість відлітні  $N_{ш} = 12$  шт
- Відстань до фронту  $l_{gi} = 24$  м
- Тепловий потік  $q = 2.57189515970058$  кВт/м<sup>2</sup>

Рис. 5.24. Робоче вікно програми для визначення тактичного варіанту локалізації і гасіння пожежі на відкритих складах лісоматеріалів

Основні параметри кварталу складу: штабелі розміром  $b \times l \times h = 6 \times 6,5 \times 6$

м; ширина поздовжніх розривів між штабелями  $b_n = 16$  м; ширина поперечних розривів між штабелями  $b_{non} = 6$  м; загальна кількість поздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною  $B_k = 94$  м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною  $L_k = 219$  м; загальна площа кварталу  $20586 \text{ м}^2$ . Пожежа виникла в ситуації  $2(94; 219)$  (рис. 5.4). Використовуючи блок-схему алгоритму (рис. 5.19) вводимо в блок 1 вхідні дані: координата пожежі  $2(94; 219)$ ;  $\alpha = 0,785$  рад; лінійна швидкість розповсюдження полум'я пожежі  $V_{II} = 0,0585$  м/с; кут дії вітру  $\alpha_g = 270^\circ$ ; швидкість вітру  $V_g = 4$  м/с;  $I_n^r = 0,2$  л/м<sup>2</sup>с;  $d = 16$  мм; тип ствола **Б РСП-50**  $L_{\max} = 30$  м; тип ствола **А РСП-70**  $L_{\max} = 30$  м;  $C_o = 2200$  грн/м<sup>2</sup>;  $C_n = 67$  грн/хв;  $\tau_{o.o} = \tau_{36} = 1$  хв;  $\tau_{3.c} = 3$  хв;  $L = 2$  км;  $V_{cl} = 32$  км/ГОД;  $\tau_{cl} = 5,25$  хв;  $\tau_{роз} = 7$  хв;  $a_1 = a_2 = a_3 = 1$ ;  $a_4 = 25,75$ , хв;  $a_5 = 5$  м;  $b_4 = 34,25$  хв;  $b_5 = 25$  м;  $h_c = 5$  м;  $b = 6$  м;  $l = 6,5$  м;  $h = 6$  м;  $R_c(\tau) = 0,84$ ;  $N_n = 12$ ;  $[p] = 0,9$ .

Після введення вхідних даних в робоче вікно програми та її запуску був отриманий наступний результат:

**1. Тактичний варіант 1.**

2.  $\tau_{cl} = 7,35$  хв,  $\tau_{в.г.} = 26,6$  хв,  $\tau_{лок} = 15,63$  хв,  $\tau_e = 22,67$  хв,  $B = 94165,23$  грн,  $S_{лок} = 14,96 \text{ м}^2$ ,  $S_{II} = 36,66 \text{ м}^2$ ,  $p = 0,9$ .

3. Стволи на гасіння **РСП-70** – 1 шт., **РСП-50** – 3 шт.; на захист **РСП-50** – 2 шт.

4. Кількість відділень – 3; кількість пожежних автоцистерн – 3; кількість пожежних спецмашин – 1.

5.  $l_q = 24$  м;  $q = 2,54$  кВт/м<sup>2</sup>.

**5.5. Порівняльний аналіз та оцінювання оптимальних тактичних методів локалізації і гасіння пожежі з існуючими**

Для виконання порівняльного аналізу та оцінювання вибору тактичних методів локалізації і гасіння пожежі розробленої системи з існуючими методами ліквідації пожежі розглянемо приклад ліквідації пожежі в

сушильному приміщенні деревообробного цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2» за адресою м. Київ, Голосіївський район, вул. Набережно-Корчуватська, 136 [16].

Повідомлення про пожежу поступило 08 січня 2015 року о 05 год 19 хв. На об'єкт для гасіння пожежі було залучено 10 одиниць основної та 4 одиниці спеціальної техніки, 71 чоловік особового складу. Пожежу було локалізовано о 14 год 30 хв та ліквідовано о 15 год. 42 хв. Площа пожежі склала 2000 м<sup>2</sup>. Матеріальні збитки склали близько 11 млн.151 тис. грн. Фрагмент ліквідації пожежі в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2» зображено на рис. 5.25.



Рис. 5.25. Фрагмент ліквідації пожежі в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2»

Для проведення порівняльного аналізу вводимо в розроблену систему дані стосовно пожежі в сушильному приміщенні деревообробного цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2».

**Вхідні дані.** В сушильному приміщенні виникла кутова пожежа з координатою  $5(0,5L; B)$  (рис. 5.11); в приміщенні відсутні пожежні відсіки  $\zeta = 1$ ; лінійна швидкість розповсюдження пожежі  $v_{л} = 0,022$  м/с;  $\alpha = 1,57$  рад; швидкість вітру  $V_{\epsilon} = 4$  м/с; напрям вітру на будівлю цеху  $\alpha_{\epsilon} = 90^{\circ}$ ; коефіцієнт,

який враховує вплив вітру на осередок приміщення цеху  $k_e = 0,66$ ; максимальна довжина суцільного струменя води з пожежного ствола  $L_{\max} = 30$  м; інтенсивність подачі води на ліквідацію пожежі  $I_n^r = 0,2$  л/м<sup>2</sup>с; діаметр насадки ствола  $d = 16$  мм; вартість одиниці площі об'єкта  $C_o = 5500$  грн./м<sup>2</sup>; допустиме значення густини теплового потоку  $[q] = 3$  кВт/м<sup>2</sup>;  $a_1 = a_2 = 2$ ;  $a_3 = 1$ ; відстань від пожежного депо до об'єкта  $L = 3$  км; швидкість слідування  $V_{cl} = 60$  км/год;  $a_4 = 24,4$  хв;  $a_5 = 10$  м;  $b_1 = 15$ ;  $b_2 = 10$ ;  $b_3 = 10$ ;  $b_4 = 32,9$  хв;  $b_5 = 25$  м;  $[p] = 0,9$ .

Після введення вхідних даних в систему і розрахунку був отриманий такий результат (рис. 5.26).

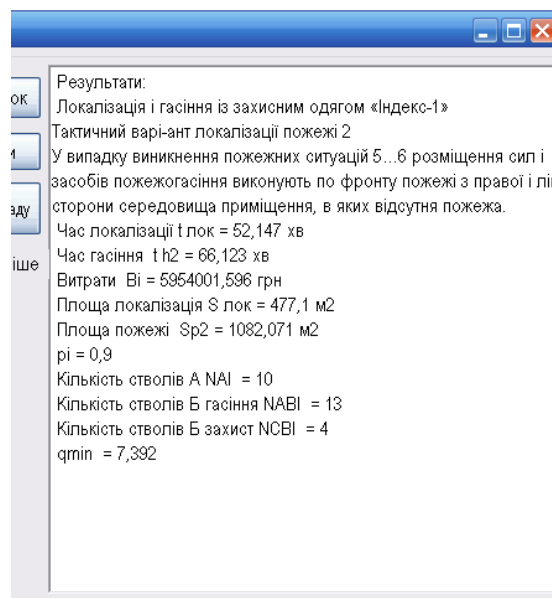


Рис. 5.26. Результат розрахунку і вибору тактичного варіанту локалізації і гасіння пожежі в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2»

Для ліквідації пожежі в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2» необхідно 10 пожежно-рятувальних відділень при використанні 10 стволів *A* і 17 стволів *B* для гасіння та захисту. Ця умова пожежно-рятувальним підрозділом була виконана. Але тривалість локалізації зайняла значно більше часу до 8 год 40 хв замість 52,15 хв. Це можна пояснити наступним чином. Повідомлення про пожежу було передано після того, коли пожежею була охоплена площа об'єкта біля 1000 м<sup>2</sup>. Такі обставини виникли у зв'язку з відсутністю на об'єкті системи

протипожежного захисту. Після закінчення локалізації тривалість ліквідації пожежі склала 72 хв. Згідно із розрахунковими даними тривалість ліквідації пожежі повинна бути в межах 66,12 хв.

Наведені результати підтверджують обґрунтованість і адекватність розробленої системи оптимізації тактики локалізації і гасіння пожежі на деревообробних підприємствах. При наявності в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2» протипожежних засобів втрати від пожежі не перевищили 5 млн.954 тис. грн замість дійсних 11 млн.151 тис. грн.

Аналогічні розрахунки виконувалися і для інших об'єктів, на яких була зафіксована пожежа. Результати отриманих даних підтвердили адекватність розробленої системи оптимізації тактики локалізації і гасіння пожежі на деревообробних підприємствах.

Наприклад, на складі готової продукції ТЗОВ «Галфанера» у м. Галичі Івано-Франківської області [17]. 25 січня 2016 року, об 11 год 30 хв до Служби порятунку «101» надійшло повідомлення про пожежу. Об 12 год 06 хв пожежу ліквідували. Фрагмент ліквідації пожежі зображено на рис. 5.27.



Рис. 5.27. Фрагмент ліквідації пожежі на складі готової продукції ТЗОВ «Галфанера»

Результати розрахунку дозволили отримати такі результати: тривалість локалізації 24,6 хв, гасіння 1,6 хв. Дійсні значення тривалості локалізації 26 хв, а гасіння – 2 хв. Збитки від пожежі склали 206 тис. грн, а за даними

розрахунків – 236 тис. грн. Відносна похибка за часом ліквідації пожежі складає 6,4%, що є допустимим для реалізації розроблених програм.

## **5.6. Висновки**

1. Розроблені математичні моделі оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж в цехах деревообробних підприємств і на відкритих складах лісоматеріалів дають підставу для впровадження в пожежно-рятувальну практику ДСНС обґрунтованих систем визначення в конкретних виниклих умовах варіантів тактики локалізації, сил і засобів для ліквідації пожежі.

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

3. Розроблені математичні моделі оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж в цехах деревообробних підприємств і на відкритих складах лісоматеріалів стали основою для розроблення алгоритмів їх розв'язку з використанням методу Монте-Карло.

4. Написання програм для ПЕОМ з використанням розроблених алгоритмів дало можливість отримати системи визначення оптимальних тактик локалізації і гасіння пожежі з одночасною мінімізацією тривалості ліквідації пожежі.

5. Розроблені системи визначення оптимальних тактик локалізації і гасіння пожежі аналізувалися з використанням існуючих пожеж на деревообробних підприємствах. Результати аналізу показали, що розроблені системи адекватні по використанню тактик локалізації і гасіння пожеж до існуючих ліквідацій пожеж і рекомендуються до впровадження в пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України.

**РОЗДІЛ 6. ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ  
ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ**

**6.1. Методи прогнозування виникнення пожежі на деревообробних підприємствах**

Прогнозування виникнення пожеж на об'єктах захисту є першочерговою основою для вирішення питань, які пов'язані з організацією ліквідації пожеж на найбільш важливих пожежонебезпечних, вибухонебезпечних і складних в оперативно-тактичному відношенні об'єктах. Використовуючи результати прогнозу виникнення пожеж на об'єктах захисту розробляють оперативні плани ліквідації пожеж, які є важливими оперативними документами.

Одним із методів прогнозування виникнення пожеж на об'єктах захисту є визначення імовірності її виникнення. Імовірність виникнення пожежі на об'єкті визначають на таких етапах: 1) проектування об'єкта; 2) будівництво; 3) в процесі експлуатації об'єкта. На сучасному етапі проектування та будівництво нових деревообробних підприємств майже не проводиться. Тому зупинимось на розгляді методів прогнозування виникнення пожеж на працюючих деревообробних підприємствах:

1. Імовірність виникнення пожежі на деревообробному підприємстві визначають на підставі статистичних даних для розглядаемого приміщення. У випадку відсутності статистичних даних допускається згідно із рекомендаціями методики МНС РФ для визначення розрахункових величин пожежного ризику імовірність виникнення пожежі рекомендовано приймати  $\varepsilon_n = 4 \cdot 10^{-2}$  [152].

2. При наявності статистичних даних про виникнення пожеж на об'єкті захисту є можливість визначити імовірність виникнення пожежі для цього

об'єкта на підставі методу короткострокового прогнозу, який розроблено авторами роботи [60]. Цей метод полягає в наступному. На підставі динаміки статистичних даних про пожежі за певний період отримується, з використанням математичної статистики, залежність для визначення кількості пожеж за цей період. Використовуючи отриману залежність є можливість визначити імовірність виникнення пожежі на період до одного року.

3. Метод аналізу пожежної небезпеки на об'єктах захисту, який полягає у визначенні наявності горючих речовин і можливих джерел запалювання, ймовірних шляхів розповсюдження пожежі й необхідних засобів пожежогасіння. Цим методом необхідно в першу чергу користуватися для визначення імовірності виникнення пожежі в цехах механічної обробки деревини. Для механічної обробки деревини в більшості випадків використовують різальні інструменти, які виготовлені із швидкорізальної сталі Р6М5. В процесі різання деревини різальні кромки таких інструментів нагріваються до температури 580°...600°С, а температура спалаху деревини знаходиться в межах 214°...255°С [238]. Тому в таких цехах на деревообробних верстатах необхідно виконувати обробку деревини з обов'язковим охолодженням різальних кромки інструментів. Метод охолодження може бути різний: стиснутим струменем газу; збільшенням розмірів (діаметру) інструменту для охолодження за рахунок збільшення часу контакту із зовнішнім середовищем; охолоджуючою рідиною.

Використовуючи розглянуті методи визначення імовірності виникнення пожежі на деревообробних підприємствах, для кожного об'єкта необхідно визначити значення імовірності і в першу чергу розробити всі необхідні заходи для його протипожежного захисту. Після розроблення протипожежних заходів необхідно для цього об'єкта встановити на ньому потрібні протипожежні засоби згідно існуючих нормативних рекомендацій. Такий підхід дозволить значно підвищити пожежну безпеку об'єкта та у випадку виникнення пожежі зменшиться тривалість її вільного розвитку,



зменшиться тривалість локалізації і ліквідації, а також зменшаться збитки від пожежі.

## **6.2. Складові математичної моделі протипожежного захисту деревообробних підприємств**

У сфері пожежної безпеки користуються терміном «пожежний ризик», тобто це є міра можливості реалізації пожежної небезпеки об'єктів захисту та її наслідків для людей і матеріальних цінностей. Гарантування пожежної безпеки об'єктів захисту складається з визначення, аналізу та оцінювання пожежного ризику, що дозволяє розробляти і впроваджувати відповідні заходи для зменшення його значення до прийняттого. Згідно із рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я [19] і Постанови Кабінету міністрів України від 29 лютого 2012 р. № 306 пожежні ризики класифікують так: 1) незначний пожежний ризик  $\varepsilon \leq 10^{-6}$ ; 2) середній  $\varepsilon = 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ ; 3) високий (терпимий) пожежний ризик  $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ ; 4) неприйнятний пожежний ризик  $\varepsilon > 5 \cdot 10^{-4}$ . В свою чергу пожежний ризик вказує на відповідну імовірність оперативної реалізації системи протипожежного захисту у випадку виникнення пожежі на об'єкті. Тому, враховуючи дійсне значення пожежного ризику, можна у випадку виникнення пожежі на об'єкті визначити очікувану величину втрат та здійснюючи управлінські заходи мінімізувати наслідки від неї, а також передбачити ефективні компенсаційні заходи.

Але в той же час зовсім не розглядалися питання застосування пожежних ризиків для визначення необхідної кількості протипожежних засобів в цехах деревообробних підприємств з метою мінімізації наслідків у випадку виникнення пожежі. В свою чергу не використання всіх необхідних протипожежних заходів, як показали результати аудиту деревообробних підприємств та аналізу наданим їм відповідних приписів, в більшості випадків призводить до значних збитків. Тому виникає проблема у більш

точному прогнозуванні для цехів деревообробних підприємств з урахуванням пожежних ризиків необхідних протипожежних заходів з метою мінімізації збитків у випадку виникнення пожежі. Розв'язування такої проблеми можливо в першу чергу за рахунок розроблення і можливого використання математичної моделі для обґрунтованого забезпечення системою протипожежного захисту об'єкта з урахуванням пожежних ризиків. Враховуючі той факт, що для цехів деревообробних підприємств математичні моделі вибору необхідних протипожежних заходів з урахуванням пожежних ризиків відсутні, то розв'язування цієї проблеми є актуальною і своєчасною задачею.

Основною задачею в процесі використання теорії прийняття рішення є вибір оцінки для прийняття відповідного рішення, тобто вибір певного критерія для прийняття цього рішення [159]. Згідно із загальною класифікацією, критеріальні задачі поділяють на класи [150]. Задачі, які пов'язані з визначенням пожежних ризиків для різних об'єктів, можуть бути віднесені до третього класу. В цьому випадку технічна система повинна функціонувати в різних умовах, з яких для кожної якість функціонування характеризується деякими частковими критеріями. Часткові критерії у задачах цього класу мають однакову природу й однакову розмірність. Такими частковими критеріями для об'єкта є прямі збитки від пожежі  $Z_o$  і витрати на протипожежний захист  $B_o$ . Для прийняття відповідного оптимального рішення значення суми цих критеріїв повинно бути найменшим, тобто

$$Z_o + B_o \Rightarrow \min . \quad (6.1)$$

Розглянемо визначення значень складових залежності (6.1). **Першою складовою** є прямі збитки від пожежі  $Z_o$ , які в свою чергу залежать безпосередньо від розмірів площі об'єкта  $Z_{o1}$ , яка знищена пожежею, і витрат пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі  $Z_{o2}$ . В цьому випадку отримаємо

$$Z_o = Z_{o1} + Z_{o2} = C_o S_{II} + C_n \tau_{z.n} N_g, \quad (6.2)$$

де  $C_o$  – вартість одного  $m^2$  площі об'єкта, яка знищена пожежею, грн/ $m^2$ ;

$S_{II}$  – площа пожежі,  $m^2$ ;

$C_n$  – вартість однієї хвилини роботи одного пожежно-рятувального відділення в процесі ліквідації пожежі, грн/хв;

$\tau_{z.n}$  – тривалість зайнятості пожежно-рятувального підрозділу для ліквідації пожежі, хв;

$N_g$  – загальна кількість відділень, яка приймала участь у ліквідації пожежі.

Для визначення площі пожежі  $S_{II}$  скористуємося залежністю з урахуванням, що тривалість вільного розвитку пожежі  $\tau_{g.z} > 10$  хв

$$S_{II} = [25 + \tau_{g.z}(\tau_{g.z} - 10)] \frac{V_{II}^2}{\xi^2} \alpha, \quad (6.3)$$

де  $\tau_{g.z}$  – тривалість вільного розвитку пожежі, хв

$$\tau_{g.z} = \tau_{g.g} + \tau_{cn} + \tau_{o.o} + \tau_{z.c} + \tau_{z.b} + \tau_{cl} + \tau_{roz}; \quad (6.4)$$

$\tau_{g.g}$  – час з моменту виникнення до виявлення пожежі, хв;

$\tau_{cn}$  – час з моменту виявлення пожежі до сповіщення про неї в пожежно-рятувальний підрозділ, хв;

$\tau_{o.o}$  – час на отримання та опрацювання сповіщення про пожежу, хв; ( $\tau_{o.o} = 1$  хв [158]);

$\tau_{z.c}$  – час на залучення сил та засобів гарнізону для гасіння пожежі, хв; ( $\tau_{z.c} = 3$  хв згідно наказу МВС України №325 від 01.07. 1993);

$\tau_{z.b}$  – час збору особового складу, хв; ( $\tau_{z.b} = 1$  хв [158]);  $\tau_{cl}$  – час слідування на пожежу, хв;

$$\tau_{cl} = \frac{60Lk_n}{V_{cl}}; \quad (6.5)$$

$L$  – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, на якому виникла пожежа, км;

$k_n$  – коефіцієнт, який враховує не прямолінійність вуличної мережі (в містобудівельній практиці його максимальне значення приймають  $k_n = 1,4$ );

$V_{сл}$  – середня швидкість руху пожежних автомобілів, км/год (в денний час  $V_{сл} = 32$  км/год; вночі – до 60 км/год [157]);

$\tau_{роз}$  – час оперативного розгортання, хв; ( $\tau_{роз} = 7$  хв [37]);

$V_{II}$  – швидкість розповсюдження полум'я пожежі в приміщенні, м/хв;

$\xi$  – коефіцієнт, який враховує використання протипожежних перегородок (при відсутності протипожежних перегородок  $\xi = 1$ ; при наявності протипожежних перегородок  $\xi = 1,8$ );

$\alpha$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі: кругова  $360^\circ$   $\alpha = 3,14$  рад; кутова  $180^\circ$   $\alpha = 1,57$  рад; кутова  $90^\circ$   $\alpha = 0,785$  рад.

Для визначення тривалості зайнятості пожежно-рятувального підрозділу для ліквідації пожежі скористуємося залежністю

$$\tau_{з.н} = \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз} + \tau_{лок} + \tau_2 + \tau_{лік}, \quad (6.6)$$

де  $\tau_{о.о}$ ,  $\tau_{з.с}$ ,  $\tau_{зб}$ ,  $\tau_{сл}$ ,  $\tau_{роз}$  – складові, які розглянуто за залежністю (6.4);

$\tau_{лок}$  – час локалізації пожежі, хв;

$\tau_2$  – час гасіння пожежі, хв;

$\tau_{лік} = 0,25(\tau_{лок} + \tau_2)$  – час на закінчення ліквідації пожежі (остаточне гасіння), хв.

*Другою складовою* залежності (6.1) є витрати на протипожежний захист  $B_o$ , які залежать від кількості та вартості засобів на протипожежний захист, що впливають на значення пожежного ризику для об'єкта. Значення  $B_o$  можна визначити за залежністю

$$B_o = \left( \sum_{i=1}^n C_i N_i \right) K_{ki}, \quad (6.7)$$

де  $C_i$  – вартість  $i$ -го засобу протипожежного захисту, грн;

$N_i$  – загальна кількість  $i$ -го засобу протипожежного захисту, шт.;

$K_{ki}$  – коефіцієнт, який враховує капітальні витрати на монтаж засобів протипожежного захисту;

$n$  – загальна кількість засобів протипожежного захисту.

**На значення критерія  $Z_o$**  за залежністю (6.1) найбільше впливають такі чинники:  $\tau_{в.в}$ ,  $\tau_{сн}$ ,  $\tau_{сл}$  та наявність в цеху протипожежних перегородок. Наприклад, тривалість з моменту виникнення до виявлення пожежі без використання системи пожежної сигналізації в кращому випадку становить 6...9 хв [212]. При використанні системи пожежної сигналізації тривалість з моменту виникнення до виявлення пожежі дорівнює часу спрацювання системи з урахуванням її інерційності, а саме 0,25 хв, тобто тривалість виявлення пожежі зменшується у 36 разів. Аналогічно можна також зауважити, що при відсутності пожежного поста з приймально-контрольним пристроєм сповіщення про пожежу в пожежно-рятувальний підрозділ миттєво передати неможливо. Крім того, наявність в цеху протипожежних перегородок або завіс (екранів) значно зменшує швидкість розповсюдження пожежі.

Крім того, на значення критерія  $B_o$  за залежністю (6.1) найбільше впливають витрати, які пов'язані з додатковим придбанням засобів протипожежного захисту.

Виходячи з наведених положень для цехів деревообробних підприємств основною системою протипожежного захисту є системи пожежної сигналізації [72]. Системи пожежної сигналізації призначені для раннього виявлення пожежі та подавання сигналу тривоги для вживання необхідних заходів для евакуювання людей, виклику пожежно-рятувальних підрозділів, запуску протидимних систем, здійснення управління протипожежними завісами, відключення або блокування (розблокування) інших інженерних систем та устаткувань при сигналі «пожежа» тощо. Для управління системами протипожежного захисту необхідно передбачати

приміщення пожежного поста, яке розміщується безпосередньо в цеху. В приміщенні пожежного поста розміщують приймально-контрольний пристрій пожежної сигналізації, який служить для прийому сигналів про пожежу від пожежних сповіщувачів, індикації місця виникнення пожежі, що охороняється і з якого прийнято сигнал, а також для передачі сигналу тривоги в підрозділи Державної служби надзвичайних ситуацій.

**Система протипожежного захисту цехів** деревообробних підприємств повинна бути повністю укомплектована і у своєму складі мати: 1) приймально-контрольний пристрій пожежної сигналізації; 2) комбіновані пожежні сповіщувачі; 3) звукові пожежні оповіщувачі; 4) систему протидимного захисту (систему димо- та тепловидалення з механізмом відкриття); 5) щільні вертикальні завіси з негорючих матеріалів, які опускаються з перекриття на підлогу, але не нижче ніж 2,5 м від підлоги, утворюючи під перекриттям резервуари диму; 6) евакуйовальні двері з системою їх автоматичного відкриття.

З урахуванням наведеного складу системи протипожежного захисту та рекомендацій [62] **розробимо математичну модель пожежного ризику**  $\varepsilon_o$  об'єкта

$$\varepsilon_o = \varepsilon_n P_l \varepsilon_{n.k.n} \varepsilon_{n.c} \varepsilon_{n.o} \varepsilon_{n.z} \varepsilon_{c.z} \varepsilon_{e.d} (1 - P_e) \leq [\varepsilon_o], \quad (6.8)$$

де  $\varepsilon_n$  – ризик виникнення пожежі в приміщенні цеху (розраховується на підставі статистичних даних для розглядаємого приміщення цеху; у випадку відсутності статистичних даних допускається приймати  $\varepsilon_n = 4 \cdot 10^{-2}$  [152]);

$P_l$  – імовірність присутності людей в приміщенні

$$P_l = \frac{\tau_l}{24}; \quad (6.9)$$

$\tau_l$  – час присутності людей в цеху, год (в більшості випадків на деревообробних об'єктах робота виконуються в дві зміни, тобто  $\tau_l = 16$  год);

$\varepsilon_{n.k.n}$  – ризик відмови приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації;

$\varepsilon_{n.c}$  – ризик відмови пожежного сповіщувача;

$\varepsilon_{n.o}$  – ризик відмови звукового пожежного оповіщувача;

$\varepsilon_{n.z}$  – ризик відмови системи протидимного захисту;

$\varepsilon_{c.z}$  – ризик відмови системи завіси;

$\varepsilon_{e.d}$  – ризик відмови евакуювальних дверей з системою їх автоматичного відкриття;

$P_e$  – імовірність евакуювання із приміщення цеху у випадку виникнення пожежі

$$P_e = 1 - (1 - P_{e.n})(1 - P_{e.a}); \quad (6.10)$$

$P_{e.n}$  – імовірність евакуації людей, які знаходяться в приміщенні цеху, по евакуаційним шляхам при реалізації сценарію пожежі;

$P_{e.a}$  – імовірність евакуації людей через аварійні виходи або за допомогою інших засобів спасіння (при відсутності даних  $P_{e.a}$  допускається приймати 0,03 при наявності аварійних виходів або засобів спасіння та 0,001 – при їх відсутності).

Імовірність евакуації людей  $P_{e.n}$  по евакуаційним шляхам в зоні виникнення пожежі визначають за залежністю

$$P_{e.n} = \frac{0,8\tau_k - \tau_e}{\tau_{n.e}}, \quad (6.11)$$

де  $\tau_k$  – критичний час пожежі, хв; (критичний час пожежі визначають з урахуванням небезпечних факторів пожежі, але як показують результати аналізу даних статистики пожеж в цехах деревообробних підприємств його значення коливається в межах 5...10 хв);

$\tau_e$  – час евакуації, хв;

$\tau_{n.e}$  – час від початку пожежі до початку евакуації, хв (при наявності в приміщенні цеху системи оповіщення про пожежу  $\tau_{n.e} = 1 \dots 2$  хв для поверху пожежі та  $\tau_{n.e} = 6$  хв для вищих поверхів [212]);

$[\varepsilon_o]$  – допустиме нормативне значення пожежного ризику для об'єкта.

При визначені імовірності евакуації людей  $P_{e.n}$  по евакуаційним шляхам в зоні виникнення пожежі за залежністю (6.11) необхідно враховувати такі положення [212]:

1) у випадку, коли  $\tau_e < 0,8 \cdot \tau_k < \tau_e + \tau_{n.e}$ , то  $P_{e.n}$  визначають за залежністю (6.11);

2) у випадку, коли  $\tau_e + \tau_{n.e} \leq 0,8 \cdot \tau_k$ , то  $P_{e.n} = 0,999$ ;

3) у випадку, коли  $\tau_e \geq 0,8 \cdot \tau_k$ , то  $P_{e.n} = 0$ .

Час евакуації  $\tau_e$  визначають за залежністю

$$\tau_e = \frac{l_e}{k_6 V_{e.o}}, \quad (6.12)$$

де  $l_e$  – шлях евакуації, м;

$$l_e = k_{кр} \sqrt{L_{np}^2 + B_{np}^2}; \quad (6.13)$$

$k_{кр} = 1,4$  – коефіцієнт, який враховує кривину шляху евакуації в зоні виникнення пожежі;

$L_{np}$  – довжина проходу цеху в зоні виникнення пожежі, м;

$B_{np}$  – ширина проходу, м;

$V_e$  – дійсна середня швидкість евакуації, м/хв;

$$V_e = 49,5 - 9,27 \ln[-\lg(0,1 + 1,284 k_{em})]; \quad (6.14)$$

$k_{em}$  – коефіцієнт, який враховує емоціональний стан людей, що евакуюються; значення цього коефіцієнту знаходиться в межах  $k_{em} = 0 \dots 0,7$  (при відсутності емоціонального стану  $k_{em} = 0$ ) [152];

$k_6$  – кількість евакуаційних виходів.



*Розглянемо значення складових математичної моделі пожежного ризику* (6.8), які ще не визначалися. Для цього скористуємося основними положеннями теорії надійності при визначені імовірності безвідмовної роботи  $R(\tau)$  відповідного елементу системи протипожежного захисту або імовірності його відмови  $F(\tau)$ .

*Ризик відмови приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації  $\varepsilon_{n.k.n}$ .* Виходячи з основних положень теорії надійності імовірність відмови електронної апаратури підпорядковується експоненціальному закону розподілу з густиною розподілу  $f(\tau) = \lambda \exp(-\lambda\tau)$  [78]. В цьому випадку отримуємо

$$\varepsilon_{n.k.n} = \int_0^{\tau} \lambda_{n.k.n} e^{-\lambda\tau} d\tau = 1 - e^{-\lambda\tau} = 1 - \exp(-\lambda_{n.k.n}\tau), \quad (6.15)$$

де  $\tau$  – час роботи приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації з початку експлуатації, год;

$\lambda_{n.k.n}$  – інтенсивність його відмов, год<sup>-1</sup>;

$$\lambda_{n.k.n} = \frac{1}{T_B}; \quad (6.16)$$

$T_B$  – час напрацювання приймально-контрольного пристрою на відмову (згідно ДСТУ EN 54-2:2003 час безперервної роботи до відмови становить 10 років), год, тобто

$$T_B = 10 \cdot 365 \cdot 24 = 87600 \text{ год};$$

$$\lambda_{n.k.n} = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}. \quad (6.17)$$

*Ризик відмови пожежного сповіщувача  $\varepsilon_{n.c}$ .* Згідно із ДСТУ EN 54-5:2003 час  $T_B$  напрацювання сповіщувача на відмову (час безперервної роботи) дорівнює 10 рокам. Тоді інтенсивність відмови сповіщувача буде дорівнювати

$$\lambda_{n.c} = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}. \quad (6.18)$$

В цьому випадку ризик відмови пожежного сповіщувача буде

$$\varepsilon_{n.c} = 1 - \exp(-\lambda_{n.c} \tau), \quad (6.19)$$

де  $\tau$  – сумарний час очікування пожежного сповіщувача до початку подачі сигналу про пожежу, год.

В той же час значення цього ризику необхідно уточнити введенням поправочного коефіцієнта  $\delta_{n.c}$ , який залежить від встановлення в цеху потрібної кількості пожежних сповіщувачів згідно із рекомендаціями [72]. В кінцевому результаті отримаємо

$$\varepsilon_{n.c} = [1 - \exp(-\lambda_{n.c} \tau)] \delta_{n.c}; \quad (8.20)$$

$$\delta_{n.c} = \frac{N_{n.c}}{N_{n.c.d}}, \quad (8.21)$$

де  $N_{n.c}$  - потрібна кількість пожежних сповіщувачів для приміщення цеху, шт.;

$N_{n.c.d}$  – дійсна кількість пожежних сповіщувачів в цеху, шт.

В свою чергу потрібну кількість пожежних сповіщувачів для приміщення цеху можна визначити з урахуванням рекомендацій [72]

$$N_{n.c} = \frac{L_{ц} B_{ц}}{S_{n.c}}, \text{ (заокр. до ціл. числа в біл. стор.)} \quad (6.22)$$

де  $L_{ц}$  – довжина внутрішнього об'єму приміщення цеху, м;

$B_{ц}$  – ширина внутрішнього об'єму приміщення цеху, м;

$S_{n.c}$  – площа, яку контролює один сповіщувач, м<sup>2</sup> (згідно із ДБН В.2.5-56:2014 п. 7.2.11  $S_{n.c} = 49 \text{ м}^2$ ).

*Ризик відмови звукового пожежного оповіщувача  $\varepsilon_{n.o}$ .* Згідно із ДСТУ EN 54-3:2003 п. 4.4 час  $T_B$  напрацювання оповіщувача на відмову (час

безперервної роботи) дорівнює 100 год. Тоді інтенсивність відмови оповіщувача буде дорівнювати

$$\lambda_{n.o} = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{100} = 10^{-2} \text{ год}^{-1}. \quad (6.23)$$

В цьому випадку ризик відмови звукового пожежного оповіщувача визначаємо з урахуванням наявності в цеху потрібної і дійсної кількості пожежних оповіщувачів, тобто з урахуванням коефіцієнта  $\delta_{n.o}$

$$\varepsilon_{n.o} = [1 - \exp(-\lambda_{n.o} \tau)] \delta_{n.o}; \quad (6.24)$$

$$\delta_{n.o} = \frac{N_{n.o}}{N_{n.o.\delta}}, \quad (6.25)$$

де  $\tau$  – сумарний час роботи оповіщувача з початку експлуатації, год;

$N_{n.o}$  – потрібна кількість пожежних оповіщувачів для приміщення цеху, шт.;

$N_{n.o.\delta}$  – дійсна кількість пожежних оповіщувачів в цеху, шт.

Значення  $N_{n.o}$  можна визначити з урахуванням рекомендацій ДСТУ EN 54-3:2003 п. 4.6.2, де вказується, що площа, яку обслуговує один оповіщувач  $S_{n.o} = 72 \text{ м}^2$ . Тоді

$$N_{n.o} = \frac{L_y B_y}{S_{n.o}} \text{ (заокр. до ціл. чис. в біл. стор.)} \quad (6.26)$$

*Ризик відмови системи протидимного захисту  $\varepsilon_{n.з}$ .* Імовірність відмови системи протидимного захисту підпорядковується нормальному закону розподілу з густиною розподілу [78]

$$f(\tau) = \frac{1}{S_\tau \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau - m_\tau)^2}{2S_\tau^2}}, \quad (6.27)$$

де  $S_\tau$  – середнє квадратичне відхилення напрацювання  $\tau$ ;

$m_\tau$  – математичне сподівання напрацювання  $\tau$ .

З урахуванням існуючих даних по часу напрацювання протипожежних засобів до відмови приймаємо для системи протидимного захисту  $T_B = 100$  год. Виходячи з цього значення середнє квадратичного відхилення буде  $S_\tau = 16,7$  год, а математичне сподівання –  $m_\tau = 50$  год.

В цьому випадку ризик відмови протидимного пристрою визначаємо з урахуванням наявності в цеху потрібної і дійсної кількості протидимних пристроїв, тобто з урахуванням коефіцієнта  $\delta_{n.з.}$ . Тоді значення ризику можна виразити через функцію Лапласа

$$\varepsilon_{n.з.} = [0,5 + \Phi(u)] \delta_{n.з.}, \quad (6.28)$$

де  $\Phi(u)$  – функція Лапласа, яка є непарною;  $\Phi(-u) = -\Phi(u)$ ;  $u$  – квантиль нормального розподілу

$$u = \frac{\tau - m_\tau}{S_\tau}; \quad (6.29)$$

$$\delta_{n.з.} = \frac{N_{n.з.}}{N_{n.з.д}}; \quad (6.30)$$

$$N_{n.з.} = \frac{L_\psi B_\psi}{S_{n.з.}} \text{ (заок. до ціл. чис. в біл. стор.)}, \quad (6.31)$$

де  $N_{n.з.}$  – потрібна кількість протидимних пристроїв для приміщення цеху, шт.;  $N_{n.з.д}$  – дійсна кількість протидимних пристроїв в цеху, шт.

$S_{n.з.}$  – площа цеху, яка обслуговується одним димоприймальним пристроєм (згідно із ДБН В.2.5-56:2014 п. 10.4.2  $S_{n.з.} = 900 \text{ м}^2$ ).

Для визначення функції Лапласа необхідно спочатку визначити квантиль нормального розподілу за залежністю (6.29) для відповідного часу  $\tau$ , а потім з використанням довідникової літератури, в якій розміщені таблиці функції Лапласа, вибрати значення  $\Phi(u)$ .

*Ризик відмови системи завіси  $\varepsilon_{c.з}$ .* Враховуючи, що щільні вертикальні завіси з негорючих матеріалів, які опускаються з перекриття на підлогу, відносять до механічних пристроїв, то імовірність їх відмови підпорядковується нормальному закону розподілу. В цьому випадку ризик відмови системи завіс визначаємо з урахуванням наявності в цеху потрібної і дійсної їх кількості та з урахуванням коефіцієнта  $\delta_{c.з}$ . Значення ризику визначаємо через функцію Лапласа

$$\varepsilon_{c.з} = [0,5 + \Phi(u)] \delta_{c.з}. \quad (6.32)$$

Значення квантиля нормального розподілу  $u$  визначаємо за залежністю (6.29) при  $S_\tau = 16,7$  год і  $m_\tau = 50$  год. Значення коефіцієнта  $\delta_{c.з}$  визначаємо за залежностями

$$\delta_{c.з} = \frac{N_{c.з}}{N_{c.з.д}}; \quad (6.33)$$

$$N_{c.з} = \frac{L_u B_u}{S_{c.з}} \text{ (заок. до ціл. чис. в біл. стор.)}, \quad (6.34)$$

де  $N_{c.з}$  – потрібна кількість систем завіс для приміщення цеху, шт.;

$N_{c.з.д}$  – дійсна кількість систем завіс в цеху, шт.;

$S_{c.з}$  – площа цеху, яка обслуговується однією системою завіс (згідно із ДБН В.2.5-56:2014 п. 10.4.3  $S_{c.з} = 1600 \text{ м}^2$ ).

*Ризик відмови евакуйовальних дверей з системою їх автоматичного відкриття  $\varepsilon_{e.д}$ .* Головною системою евакуйовальних дверей є пристрій для автоматичного їх відкривання, який спрацьовує від сигналу системи пожежних сповіщувачів. Згідно із паспортом на цей пристрій гарантійний термін безвідмовної роботи становить один рік, тобто  $T_B = 8760$  год = 525600 хв. Тоді  $\lambda_{e.д} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ хв}^{-1}$ , що дозволяє визначити значення ризику

$$\varepsilon_{e.д} = 1 - \exp(-\lambda_{e.д} \tau). \quad (6.35)$$

*В процесі аудиту об'єкта* по забезпеченню його протипожежними засобами необхідно використовувати математичну модель пожежного ризику (6.8). У випадку відсутності будь-якого компонента системи, який необхідно враховувати в залежності (6.8), потрібно замість цієї складової підставити цифру 1.

Якщо в процесі визначення пожежного ризику для об'єкта за залежністю (6.8) буде встановлено, що отриманий результат не задовольняє допустимого значення пожежного ризику, то в цьому випадку необхідно виконати в першу чергу аналіз всіх розрахованих коефіцієнтів  $\delta_i$ . На підставі результатів аналізу цих коефіцієнтів необхідно розробити заходи на доукомплектування об'єкта протипожежними засобами з метою наближення значень коефіцієнтів до одиниці, керуючись також прийнятим критерієм (6.1) для мінімізації збитків у випадку виникнення пожежі. При цьому необхідно доукомплектувати такими компонентами, які б забезпечували мінімум витрат за залежністю (6.7).

Крім цього, у випадку вичерпання терміну експлуатації елементів системи значення кожного відповідного ризику буде наближатися до (0,632), що не дозволить забезпечити допустимого значення пожежного ризику. Тому при розробленні заходів на доукомплектування об'єкта протипожежними засобами необхідно також враховувати заміну елементів, термін використання яких закінчується.

### **6.3. Математична модель визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємствах**

В параграфі 6.2 були отримані залежності, які необхідні для розроблення математичної моделі визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємствах. Тому, використовуючи ці залежності, переходимо до розроблення математичної моделі.

**Розроблення оптимізаційної математичної моделі** визначення методів і засобів протипожежного захисту для об'єкта з урахуванням допустимого значення пожежного ризику.

**Функція мети**

$$\varepsilon_o \Rightarrow \min \leq [\varepsilon_o]; \quad (6.36)$$

**за критерієм**

$$B = Z_o + B_o \Rightarrow \min; \quad (6.37)$$

**за обмеженнями**

$$a_1 \leq \delta_{n.c} \leq b_1; \quad (6.38)$$

$$a_2 \leq \delta_{n.o} \leq b_2; \quad (6.39)$$

$$a_3 \leq \delta_{n.3} \leq b_3; \quad (6.40)$$

$$a_4 \leq \delta_{c.3} \leq b_4; \quad (6.41)$$

$$p \geq [p], \quad (6.42)$$

де  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – мінімальні значення обмежень;  $b_1, b_2, \dots, b_4$  – максимальні значення обмежень;  $p$  – імовірність попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків ( $p = k/N$ , де  $k$  – кількість циклів роботи програми, при яких досліджувальні точки попали в область допустимих розв'язків;  $N$  – загальна кількість циклів роботи програми);  $[p]$  – допустиме значення імовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення.

Значення обмежень  $a_1, a_2, a_3, a_4$  можна приймати однаковими і такими, що дорівнюють одиниці. Такий підхід до прийняття такого значення можна обґрунтувати тим, що мінімальне значення цих коефіцієнтів в обмеженнях (6.38)...(6.41) буде в тому випадку, коли встановлена в цеху кількість протипожежних засобів відповідає нормативним вимогам. По аналогії приймаємо максимальне значення обмежень  $b_1, b_2, b_3, b_4$  такими, що дорівнюють 15.

Для розв'язування оптимізаційної моделі скористуємося методом Монте-Карло. Область допустимих розв'язків, яка визначається

обмеженнями (6.38)...(6.41), оточують  $m$ -мірним паралелепіпедом, в якому проводимо дослідження. Поставлену задачу краще всього розв'язувати з використанням комп'ютера. За допомогою давача комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$  в інтервалі  $0 \dots 1$ . Для перетворення псевдовипадкових чисел  $\mu_{ji}$ , які рівномірно розподілені в інтервалі  $0 \dots 1$ , до значень  $\delta_i$  використовуємо залежності виду, наприклад, для  $\delta_{n.c.i}$

$$\delta_{n.c.i} = a_1 + \mu_{1i}(b_1 - a_1),$$

де:  $\mu_{1i}$  – псевдовипадкове число для визначення чинника  $\delta_{n.c.i}$  на певному  $i$ -тому циклі розрахунку.

В процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначаються значення  $\varepsilon_o$  за залежністю (6.8) та критеріїв  $Z_o$  і  $B_o$ , які перевіряються зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконуються до тих пір, поки буде виконана умова (6.42). Після завершення роботи програми на друк видаються такі дані:  $\varepsilon_o$ ,  $\tau_{в.з}$ ,  $S_{II}$  до і після впровадження протипожежних засобів;  $V_{сл}$ ,  $\tau_{сл}$ ,  $\tau_{лок}$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_{лік}$ ,  $p$ ; типи протипожежних засобів їх вартість і кількість та загальні додаткові витрати на їх придбання.

#### 6.4. Програмна реалізація моделей та алгоритмів

Після розроблення математичної моделі переходимо до розгляду блок-схеми алгоритму її розв'язку. Першим блоком алгоритму є введення вхідних даних, до яких відносимо:

**ширина** цеху  $B_{ц}$ , м;  
**довжина** цеху  $L_{ц}$ , м;  
**кількість** пожежних відсіків у цеху  $II$ , шт.;  
**дійсна** кількість пожежних сповіщувачів в цеху  $N_{n.c.д}$ , шт.;  
**сумарний** час очікування пожежного сповіщувача  $\tau_{n.c}$ , год;  
**площа**, яку контролює один сповіщувач  $S_{n.c}$ , м<sup>2</sup>;  
**дійсна** кількість пожежних оповіщувачів в цеху  $N_{n.o.д}$ , шт.;  
**сумарний** час роботи оповіщувача  $\tau_{n.o}$ , год;  
**площа**, яку контролює один оповіщувач  $S_{n.o}$ , м<sup>2</sup>;



**наявність** приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації  $P_k$ , шт.;

**час роботи** приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації з початку експлуатації  $\tau_{n.k.n}$ , год;

**дійсна** кількість протидимних пристроїв в цеху  $N_{n.з.д}$ , шт.;

**сумарний** час роботи протидимних пристроїв  $\tau_{n.з}$ , год;

**площа** цеху, яка обслуговується одним димоприймальним пристроєм  $S_{n.з}$ , м<sup>2</sup>;

**дійсна** кількість систем завіс в цеху  $N_{c.з.д}$ , шт.;

**площа** цеху, яка обслуговується однією системою завіс  $S_{c.з}$ , м<sup>2</sup>;

**сумарний** час роботи завіси.  $\tau_{c.з}$ , год;

**наявність** евакуювальних дверей з системою їх автоматичного відкриття  $ED$ , шт.;

**тривалість** роботи  $ED$  в період евакуації  $\tau_{e.д}$ , хв;

$VD$  – кількість звичайних дверей для виходу, шт.;

$\tau_l$ , год – час присутності людей в цеху;

$C_o$ , грн/м<sup>2</sup> – середня вартість одного квадратного метра площі об'єкта;

$C_n$ , грн/хв – середня вартість однієї хвилини роботи пожежно-рятувальних підрозділів;

$V_l$ , м/хв – лінійна швидкість розповсюдження пожежі;

$\alpha$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі;

$L$ , км – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта;

$V_{сл}$ , км/год – швидкість руху пожежного автомобіля;

$N_e$  – загальна кількість відділень, яка приймає участь в ліквідації пожежі;

$P_e$  – імовірність евакуації людей;

$[\epsilon_o]$  – допустиме значення пожежного ризику;

$[p]$  – допустиме значення імовірності попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків.

Початок блок-схеми алгоритму визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту для деревообробних підприємств зображено на рис. 6.1.

Після введення вхідних даних в наступних блоках виконується занулення циклів роботи комп'ютера, визначення площі цеху, перевірка наявності приймально-контрольного пристрою та визначення ризику його відмови, перевірка наявності пожежних сповіщувачів та визначення ризику їх відмови, перевірка наявності пожежних оповіщувачів та визначення ризику їх відмови, перевірка наявності протидимних пристроїв в цеху та визначення ризику їх відмови, перевірка наявності пожежних відсіків у цеху.

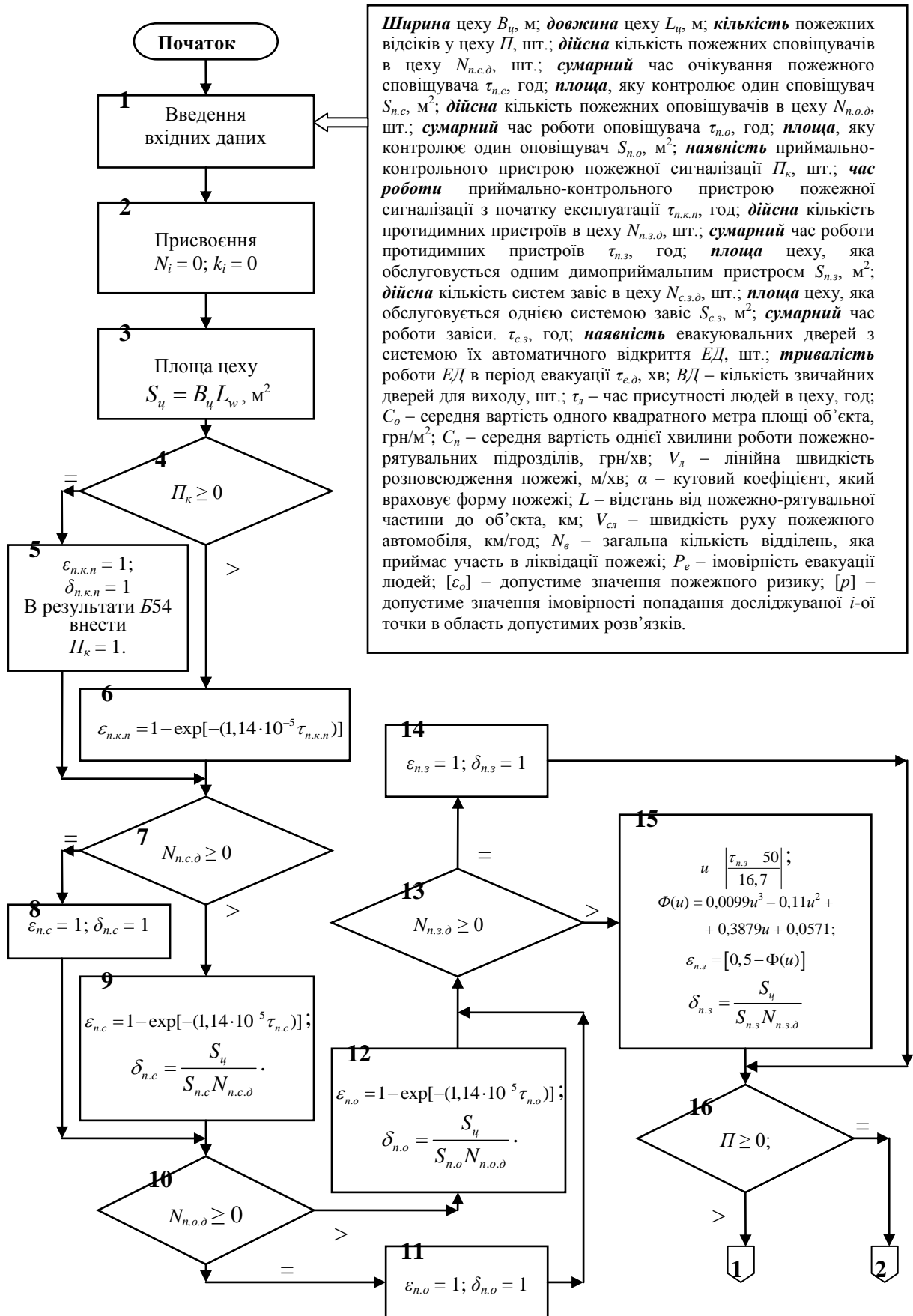


Рис. 6.1. Блок-схема алгоритма визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств (початок)

Для виконання наведених операцій використовується 16 блоків. Після цього процес продовжується з блока 17 (рис. 6.2).

В блоках 17 і 18 визначається ризик відмови систем завіси. Після цього виконується перевірка наявності евакуйовальних дверей з системою їх автоматичного відкриття та визначення ризику їх відмови, визначення існуючого значення пожежного ризику для об'єкту і перевірка з допустимим значенням. Наступним кроком є визначення максимально прогнозованої тривалості вільного горіння та відповідних значень обмежень на обмеження (6.38)...(6.41), присвоєння номера циклу роботи комп'ютера  $N_i = N_i + 1$ , генерація псевдовипадкових чисел та визначення для відповідного циклу роботи комп'ютера значень  $\delta_i$ . Робота цієї частини блок-схеми закінчується на блоці 37а.

Продовження блок-схеми починається з блока 38 (рис. 6.3). В блоках 38...44 визначаються ризики відмови всіх протипожежних засобів, які необхідні для розміщення в цеху. На підставі отриманих даних в блоці 45 визначається значення пожежного ризику для об'єкта. Після цього виконується перевірка значення пожежного ризику з допустимим. У випадку виконання умови виконується визначення необхідної додаткової кількості протипожежних засобів для забезпечення пожежного ризику об'єкта.

В наступних блоках визначається площа пожежі і локалізації, тривалість локалізації, гасіння і ліквідації пожежі, час зайнятості ПРП для ліквідації пожежі, а також збитки об'єкта від пожежі і витрати на протипожежний захист об'єкта і загальні втрати.

Після перевірки кількості загальних циклів роботи комп'ютера в блоці 49а виконується перехід до блока 50 (рис. 6.4).

В блоці 50 виконується перевірка значення критерія оптимізації і перехід до наступних блоків, в яких визначається значення імовірності попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків та виконується порівняння з допустимим. Після цього виконується роздрук результатів.

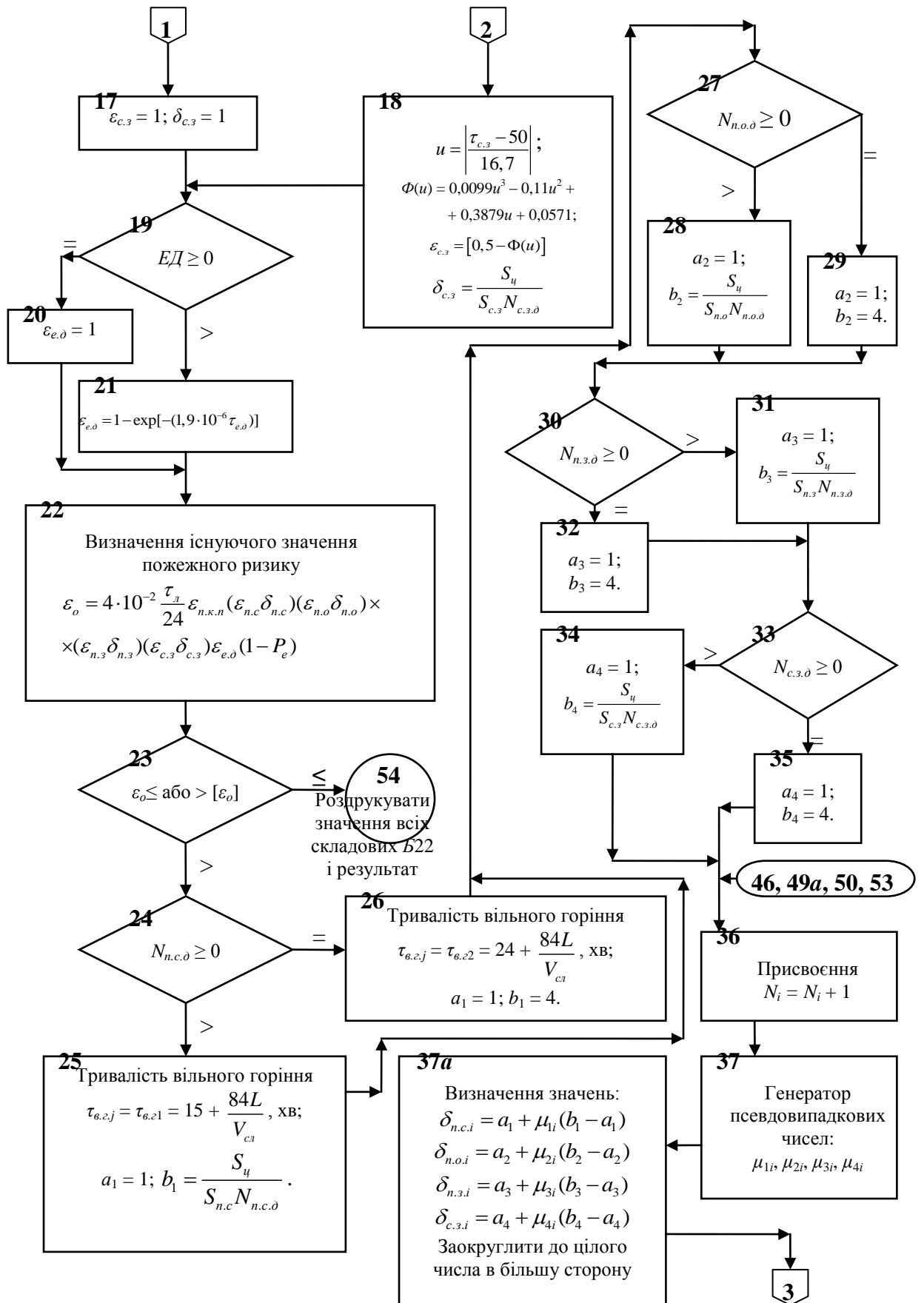


Рис. 6.2. Блок-схема алгоритма визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств (продовження)

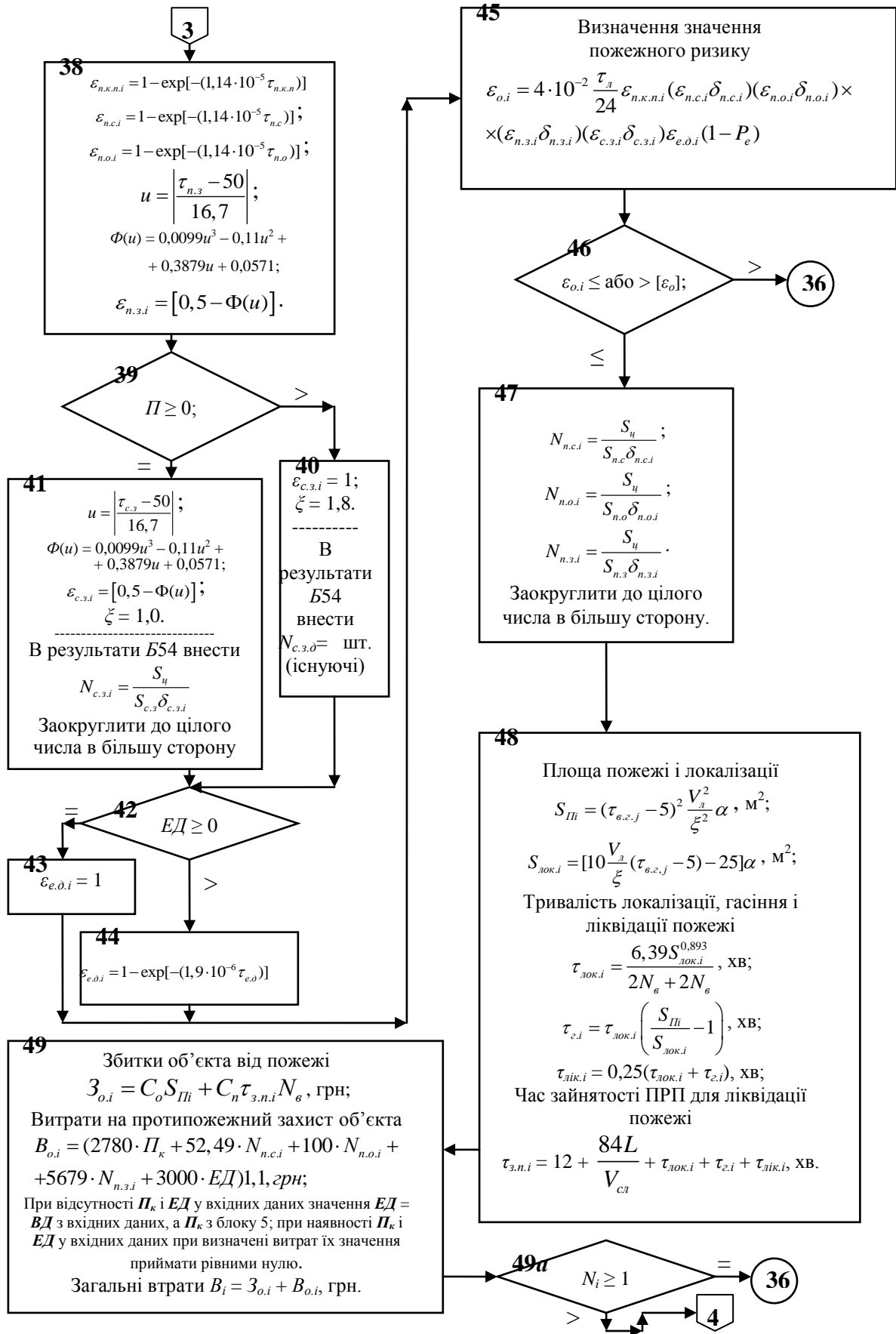


Рис. 6.3. Блок-схема алгоритма визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств (продовження)

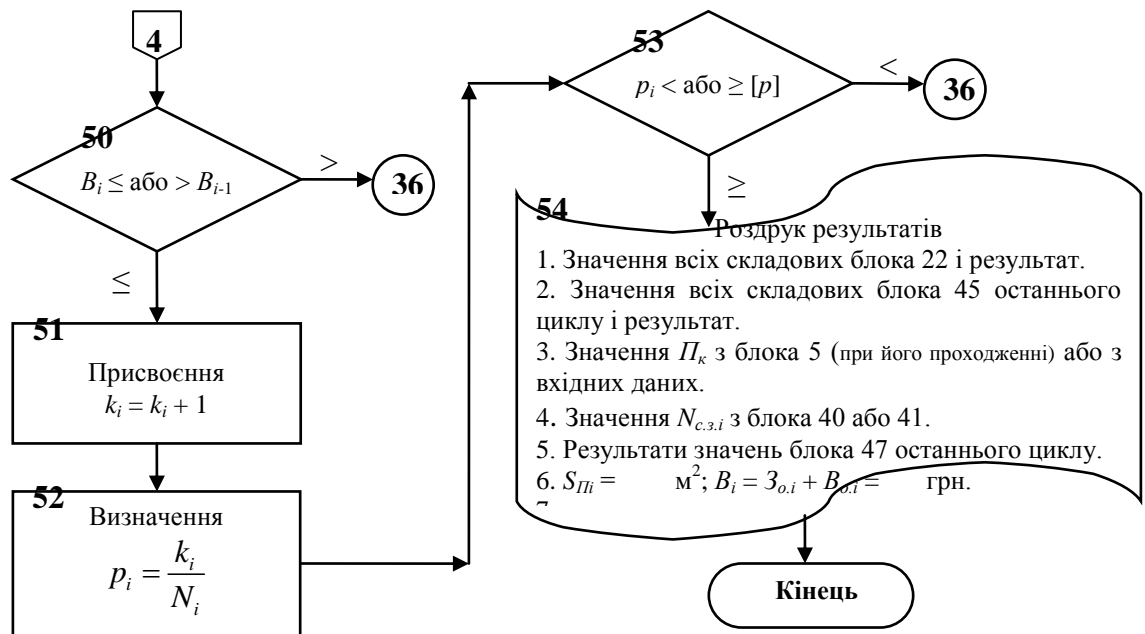


Рис. 6.4. Блок-схема алгоритма визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств (закінчення)

На підставі розробленої блок-схеми алгоритма визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств була написана програма на мові С# для роботи в середовищі Windows XP (додаток 7). Час роботи комп'ютера становив 6-8 с для 5 тисяч випробувань ( $N_i$  – циклів) при імовірності попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків  $p = 0,90 \dots 0,96$ . Робоче вікно програми зображено на рис. 6.5.

Для роботи програми необхідно ввести вхідні дані в робоче вікно згідно запиту, який розміщений з лівої сторони вікна. Після цього, при необхідності, увімкнути кроковий обрахунок і натиснути рахувати.

Результати розрахунку (роздрук) буде наведено в правому вікні. Для більш детального розгляду роботи програми розглянемо приклад розрахунку.

**Приклад.** Провести аудит деревообробного цеху для визначення існуючого значення пожежного ризику та при необхідності, з метою забезпечення його допустимого значення, вибрати необхідні протипожежні засоби.

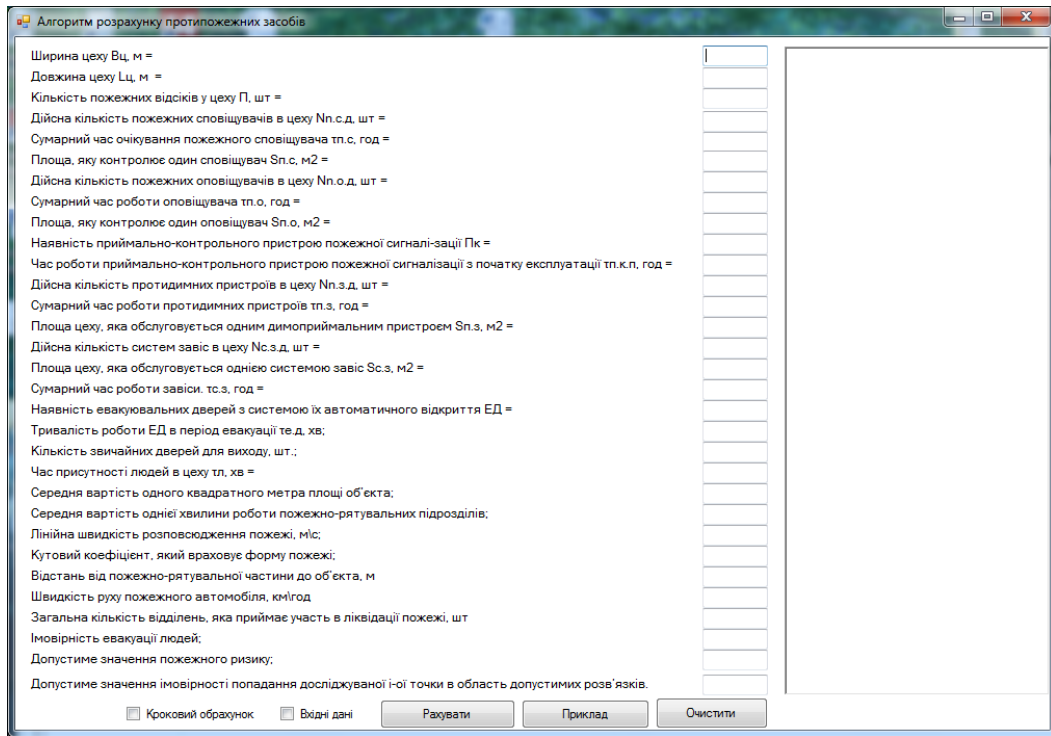


Рис. 6.5. Робоче вікно програми для визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств

Вхідні дані:

**ширина** цеху  $V_{ц} = 72$  м;

**довжина** цеху  $L_{ц} = 144$  м;

**кількість** пожежних відсіків у цеху  $\Pi = 4$  шт.;

**дійсна** кількість пожежних сповіщувачів в цеху  $N_{n.c.d} = 20$  шт.;

**сумарний** час очікування пожежного сповіщувача  $\tau_{n.c} = 17520$  год;

**площа**, яку контролює один сповіщувач  $S_{n.c} = 49$  м<sup>2</sup>;

**дійсна** кількість пожежних оповіщувачів в цеху  $N_{n.o.d} = 0$  шт.;

**сумарний** час роботи оповіщувача  $\tau_{n.o} = 0$  год;

**площа**, яку контролює один оповіщувач  $S_{n.o} = 72$  м<sup>2</sup>;

**наявність** приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації  $\Pi_k = 1$  шт.;

**час роботи** приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації з початку експлуатації  $\tau_{n.k.n} = 17520$  год;

**дійсна** кількість протидимних пристроїв в цеху  $N_{n.z.d} = 2$  шт.;

**сумарний** час роботи протидимних пристроїв  $\tau_{n.z} = 2$  год;

**площа** цеху, яка обслуговується одним димоприймальним пристроєм  $S_{n.z} = 900$  м<sup>2</sup>;

**дійсна** кількість систем завіс в цеху  $N_{c.z.d} = 0$  шт.;

**площа** цеху, яка обслуговується однією системою завіс  $S_{c.z} = 1600$  м<sup>2</sup>;

**сумарний** час роботи завіси.  $\tau_{c.z} = 2$  год;

**наявність** евакуйовальних дверей з системою їх автоматичного відкриття  $ED = 0$  шт.;

**тривалість** роботи ЕД в період евакуації  $\tau_{e.o}$ , хв;  
 $ВД = 6$  – кількість звичайних дверей для виходу, шт.;  
 $\tau_l = 16$  год – час присутності людей в цеху;  
 $C_o = 2500$  грн/м<sup>2</sup> – середня вартість одного квадратного метра площі об'єкта;  
 $C_n = 67$  грн/хв – середня вартість однієї хвилини роботи пожежно-рятувальних підрозділів;  
 $V_l = 1,3$  м/хв – лінійна швидкість розповсюдження пожежі;  
 $\alpha = 0,785$  – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі;  
 $L = 1,8$  км – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта;  
 $V_{сл} = 32$  км/год – швидкість руху пожежного автомобіля;  
 $N_e = 2$  – загальна кількість відділень, яка приймає участь в ліквідації пожежі;  
 $P_e = 0,4$  – імовірність евакуації людей;  
 $[\varepsilon_o] = 0,00005$  – допустиме значення пожежного ризику;  
 $[p] = 0,9$  – допустиме значення імовірності попадання досліджуваної  $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків.

Вводимо вхідні дані в робоче вікно програми. Після вмикання крокового обрахунку натискаємо клавішу «Рахувати». Після цього отримуємо результат (рис. 6.6).

Ширина цеху Вц, м =	72
Довжина цеху Лц, м =	144
Кількість пожежних відсіків у цеху П, шт =	4
Дійсна кількість пожежних сповіщувачів в цеху Nп.с.д, шт =	20
Сумарний час очікування пожежного сповіщувача тп.с, год =	17520
Площа, яку контролює один сповіщувач Sp.с, м2 =	49
Дійсна кількість пожежних оповіщувачів в цеху Nп.о.д, шт =	0
Сумарний час роботи оповіщувача тп.о, год =	8760
Площа, яку контролює один оповіщувач Sp.о, м2 =	72
Наявність приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації Пк =	1
Час роботи приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації з початку експлуатації тп.к.п, год =	17520
Дійсна кількість протидимних пристроїв в цеху Nп.з.д, шт =	2
Сумарний час роботи протидимних пристроїв тп.з, год =	2
Площа цеху, яка обслуговується одним димоприймальним пристроєм Sp.з, м2 =	900
Дійсна кількість систем завіс в цеху Nс.з.д, шт =	0
Площа цеху, яка обслуговується однією системою завіс Sc.з, м2 =	1600
Сумарний час роботи завіси, тс.з, год =	2
Наявність евакуйовальних дверей з системою їх автоматичного відкриття ЕД =	0
Тривалість роботи ЕД в період евакуації те.д, хв:	60
Кількість звичайних дверей для виходу, шт.:	6
Час присутності людей в цеху тл, хв =	16
Середня вартість одного квадратного метра площі об'єкта:	2500
Середня вартість однієї хвилини роботи пожежно-рятувальних підрозділів:	67
Лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/с:	1,3
Кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі:	0,785
Відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, м	1,8
Швидкість руху пожежного автомобіля, км/год	32
Загальна кількість відділень, яка приймає участь в ліквідації пожежі, шт	2
Імовірність евакуації людей:	0,4
Допустиме значення пожежного ризику:	0,00005
Допустиме значення імовірності попадання досліджуваної $i$ -ої точки в область допустимих розв'язків.	0,9

bcz = 1  
 eed = 1  
 Pe = 0,4  
 eo = 0,0000543  
 2 Блок 45. Визначення значення пожежного ризику  
 eoi = 2E-09  
 ti = 16  
 enki = 0,181  
 enci = 0,181  
 bnai = 8  
 enoi = 0,095  
 bnai = 2enai = 0,002  
 bnzi = 5  
 eczi = 1  
 bcz = 3  
 eed = 0,0001  
 Pe = 0,4  
 Результати обчислень 48 блоку:  
 Площа пожежі SPi = 88,8 м2.  
 Площа локалізації пожежі Sloki = 63,9 м2.  
 Тривалість локалізації tloki = 32,7 хв  
 Тривалість гасіння tti = 13 хв  
 Тривалість остаточної ліквідації пожежі tiki = 11,4 хв  
 Час зайнятості ПРП для ліквідації пожежі tzpi = 73,5 хв  
 3 Перевірка наявності приймально-контрольного пристрою  
 Значення Пк = 1  
 4 Перевірка наявності протидимних пристроїв в цеху  
 Значення Ncz=0  
 5 Результати значень блоку 47 останнього циклу  
 Кількість пожежних сповіщувачів Nnci = 27 шт.  
 Кількість пожежних оповіщувачів Nnoi = 72 шт.  
 Кількість протидимних пристроїв Nnzi = 3 шт.  
 Загальні витрати Ві = 282881,1 грн.

Рис. 6.6. Результат розрахунку для визначення протипожежних засобів



Результат аналізу отриманих розрахунків для визначення протипожежних засобів показує:

1. Пожежний ризик для існуючого цеху без переобладнання протипожежними засобами складає  $\varepsilon_0 = 0,0000543$ , що перебільшує допустиме значення.

2. Кількість пожежних сповіщувачів рекомендується збільшити до 27 шт.

3. Кількість пожежних оповіщувачів рекомендується встановити в цеху 72 шт.

4. Кількість протидимних пристроїв рекомендується збільшити до 3 шт.

5. Після проведення цих заходів значення пожежного ризику зменшиться до  $2 \cdot 10^{-9}$ .

6. При таких умовах площа пожежі у випадку її виникнення буде не більшою  $88,8 \text{ м}^2$ , а тривалість локалізації не перевищить 32,7 хв, тривалість гасіння – 13 хв, тривалість кінцевої ліквідації пожежі – 11,4 хв.

7. Загальний час зайнятості ПРП не перевищить 73,5 хв.

8. Збитки об'єкта від пожежі при забезпеченні його протипожежними засобами не перевищать 231803,4 грн, а витрати на придбання протипожежних засобів, які відсутні в цеху, складають 51077,7 грн.

Таким чином, можна зробити висновок, що розроблена система для визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств повністю забезпечує поставлену мету.

#### **6.5. Економічна ефективність впровадження методів і засобів протипожежного захисту та підвищення ефективності локалізації і гасіння пожеж на деревообробних підприємствах**

Економічну ефективність від впровадження системи для визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних

підприємств, а також системи оптимізації сил і засобів для ліквідації пожежі та оптимізації тактики її локалізації і ліквідації, можна визначити, як різницю між прямими збитками до та після впровадження розглянутих методів

$$E = Z_1 - Z_2, \quad (6.43)$$

де  $Z_1$ ,  $Z_2$  – відповідно прямі збитки від пожеж до і після впровадження розроблених методів і рекомендацій в практику пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС, грн.

Для виконання розрахунків за залежністю (6.43) розглянемо вплив кожної складової розглянутих рекомендацій на зміну чинників, які впливають на параметр  $Z_2$ . Результати статистичного аналізу багаточисельних обстежень за даними розроблених рекомендацій дозволили отримати наступні дані (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Результати статистичного аналізу

№ з/п	Розроблені методи і засоби	Ефективність розробки	Числовий вплив на ефективність	Зменшення площі пожежі $\Delta S$ , %
1	Обґрунтування оптимальних розмірів пожежних відсіків для цеху	Зменшує швидкість розповсюдження пожежі	Зменшує $V_L$ в 1,8 рази	30,9
2	Система протипожежного захисту об'єкта	Зменшує тривалість вільного горіння	Зменшує $\tau_{в.г}$ на 9 хв	27,7
3	Оптимізація сил і засобів для ліквідації пожежі	Забезпечує не розповсюдження площі пожежі	Зменшує збитки $Z_1$ від пожежі на 26,8%	-
4	Оптимізація тактики локалізації пожежі	Зменшує тривалість оперативного розгортання і відповідно вільного горіння	Зменшує $\tau_{в.г}$ на 2 хв	19,9
<b>Всього</b>				<b>78,5</b>

Прямі збитки від пожеж  $Z_1$  до впровадження розроблених методів і рекомендацій в практику пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС приймаємо як середньостатистичні дані від зареєстрованих пожеж на деревообробних підприємствах [102, 100, 101, 16, 17], а саме  $Z_1 = 71329$  грн на одну пожежу. Прямі збитки від пожеж  $Z_2$  після впровадження методів і рекомендацій в практику пожежно-рятувальних підрозділів визначаємо за залежністю

$$Z_2 = Z_1 \left(1 - \frac{\Delta S}{100}\right) = 71329 \left(1 - \frac{78,5}{100}\right) = 15336 \text{ грн на одну пожежу. (6.44)}$$

Крім цього, впровадження оптимізації сил і засобів для ліквідації пожежі зменшує збитки  $Z_1$  від пожежі на 26,8%. Тоді

$$Z_2 = 15336 \left(1 - \frac{26,8}{100}\right) = 11226 \text{ грн на одну пожежу.}$$

Тоді економічний ефект на одну пожежу за рахунок підвищення ефективності роботи пожежно-рятувальних підрозділів буде

$$E = Z_1 - Z_2 = 71329 - 11226 = 60103 \text{ грн.}$$

Виходячи з того положення, що на Україні за даними статистики на деревообробних підприємствах за рік виникає 90...100 пожеж [16, 17], економічний ефект за рік, за рахунок зменшення прямих збитків від пожеж та впровадження розроблених рекомендацій, складатиме

$$E_2 = 60103 \cdot 95 = 5709785 \text{ грн.}$$

## 6.6. Висновки

1. Розроблена математична модель для визначення кількості всіх необхідних засобів протипожежного захисту об'єкта, яка дозволяє

розробляти і впроваджувати заходи для ефективного захисту деревообробних підприємств при виникненні пожежі.

2. Розроблена на основі математичної моделі блок-схема алгоритма для визначення кількості всіх необхідних засобів протипожежного захисту об'єкта дозволила написати програму на мові С# і тим самим розробити систему, яку можна також використовувати при проведенні аудиту деревообробних підприємств і розроблені заходів для протипожежного захисту об'єкта.

3. Розроблені в монографії методи і рекомендації після повного впровадження в пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України дозволять отримати економічний ефект в сумі 5 млн.709 тис. грн.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов Ю.А. Нагрев поверхностного слоя нефтепродукта в резервуаре от факела горящего резервуара / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, И.Б. Туркин // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2004. – Вып. 16. – С. 3-7.
2. Абрамов Ю.А. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов. – Харьков: АГЗУ, 2006. – 251 с.
3. Абрамов Ю.А. Алгоритм оптимального расположения сил и средств для тушения пожара в резервуарном парке / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов. // Проблемы надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. АЦЗ України. – Харків: Фолио, 2006. – Вип. 3. – С. 26-32.
4. Автоматичні системи пожежогасіння. – Режим доступу: [http://ua.perun.ua/accordions/view/sistemi\\_pozhezhogasnyua](http://ua.perun.ua/accordions/view/sistemi_pozhezhogasnyua).
5. Автоматичні системи пожежогасіння. – Режим доступу: <http://remontvdome.com.ua/avtomatichni-sistemi-pozhezhogasinnya>.
6. Аналіз ризику стану екологічної безпеки України. – Режим доступу: <http://www.ukrajinciberlinu.wordpress.com/2009/11/08>.
7. Андрейцев В.І. Концепція Закону України про екологічну (природно-техногенну) безпеку / В.І. Андрейцев // Матеріали семінару з питань законодавства по екологічній безпеці. – К.: АН України, 1998. – С. 18-24.
8. Андрейцев В. І. Право екологічної безпеки / В.І. Андрейцев. - К. : Знання-Прес, 2002. - 332 с.
9. Андрусейко О.Б. Склади зберігання пиломатеріалів: особливості запобігання виникненню пожежі / О.Б. Андрусейко, Ю.І. Грицюк // Пожежна безпека. – 2013. - № 23. – С. 7-13.
10. Аникиев В.В. Интегральный критерий экологической безопасности. / В.В. Аникиев, П.В., Захарова // Геоинформатика. – 2002. – № 1. – С. 18-24.

11. Артемьев Н.С. Исследование распространения пожара на лесоскладах за счет переноса высокотемпературных частиц. / Н.С. Артемьев // Дис. канд. техн. наук. – М.: ВИПТШ, 1981.
12. Артемьев Н.С. Исследование распространения пожаров на лесоскладах за счет переноса высокотемпературных частиц / Н.С. Артемьев // Автореф. канд. дис. – М.: ВИПТШ, 1981. – 18 с.
13. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. / В.И. Асатурян. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.
14. Астапенко В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков. – М.: Стройиздат, 1986. – 370 с.
15. Астахова И.Ф. Развитие полевого моделирования пожара в помещении и теории огнестойкости в России. / И.Ф. Астахова, И.С. Молчадский // Моделирование пожаров и взрывов. – М.: Изд. «Пожнаука», 2000. С. 89-105.
16. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 2015 рік. Режим доступу: [http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2015/2/17/AD\\_01\\_15.pdf](http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2015/2/17/AD_01_15.pdf).
17. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 2016 рік. Режим доступу: [http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2016/2/18/AD\\_01\\_16.pdf](http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2016/2/18/AD_01_16.pdf).
18. Басманов О.Є. Теоретичні основи попередження каскадного розповсюдження пожежі в резервуарних парках з нафтопродуктами і підвищення ефективності її ліквідації. / Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 21.06.02 / О.Є. Басманов – Харків: УЦЗ України, 2006. – 36 с.
19. Бегун В.В. Безопасность жизнедеятельности: / В.В. Бегун , І.М. Науменко. – К.: 2004. – 328 с.
20. Безродный И.Ф. Современные технологии пожаротушения / И.Ф. Безродный, В.А. Меркулов, А.Н. Гилетич // Юбилейный сборник трудов ВНИИПО. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997. – С. 335-339.

21. Белов И.В. Транспортная модель распространения газообразных примесей в атмосфере города. / И.В. Белов И.В. // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12, № 11. – С. 38-46.

22. Беликов А.С. Безопасность жизнедеятельности ч. 1, 2 / А.С. Беликов, Г.Н. Крикунов, В.Ф. Залуниин – Днепропетровск: «Пороги», 1992. – 412 с.

23. Беликов А.С. Безопасность жизнедеятельности ч. 3 / А.С. Беликов, Г.Н. Крикунов, В.Ф. Залуниин – Днепропетровск: УКО ИМА пресс, 1995. – 195 с.

24. Беликов А.С. Контроль высокотемпературного излучения на рабочих местах / А.С. Беликов, В.А. Шаломов, С.Ю. Рагимов, А.С. Чаплыгин // «Строительство, материаловедение, машиностроение»//Сборник научных трудов. Вып.80. – Днепропетровск, ГВУЗ «ПГАСА», 2015. – С. 49-55.

25. Биченок М.М. Автоматизация управління захистом регіону у надзвичайних ситуаціях. Автореф. дис. ... доктора техн. наук. – К.: Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова, 1998. – 38 с.

26. Большеротов, А. Л. Международные системы оценки экологической безопасности строительства / А. Л. Большеротов, Л. В. Большеротова // Жилищное строительство. - 2012. - № 10. - С. 42-45.

27. Большеротов, А. Л. Существующие методы оценки загрязнения окружающей среды и воздействия на нее / А. Л. Большеротов, Л. В. Большеротова // Жилищное строительство. - 2012. - № 11. - С. 37-41.

28. Большеротов, А. Л. Стратегия обеспечения экологической безопасности строительства. Ч. 1. Современное состояние / А. Л. Большеротов, Л. В. Большеротова // Жилищное строительство. - 2012. - № 12. - С. 39-41.

29. Большеротов, А. Л. Взаимосвязь развития строительства и экологических проблем / А. Л. Большеротов // Жилищное строительство. - 2012. - № 6. - С. 86-88.

30. Бондарев В.Ф. Методические основы расчета сил и средств для проведения спасательных работ при пожаре / В.Ф. Бондарев, С.А. Бороздин, Э.А. Зычков // Материалы XVI научно – практической конф. «Крупные пожары:предуприждение и тушение». – Ч. 2 – М.: ВНИИПО, 2001. – С. 252 – 254.

31. Брушлинский Н.Н. Моделирование тушения пожаров в городах / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов // Моделирование пожаров и взрывов. – М.: Пожнаука, 2000. – С. 447-476.

32. Брушлинский Н.Н. Системный анализ и проблемы пожарной безопасности народного хозяйства / Н.Н. Брушлинский, В.В. Кафилов, В.И. Козлачков и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 413 с.

33. Брушлинский Н.Н. ЭВМ и АСУ в пожарной охране / Н.Н. Брушлинский, А.Ф. Гришин, В.Л. Семенов // Итоги науки и техники / Сер. Пожарная охрана / ВИНТИ. – М.: 1979. – Т. 3 – 240 с.

34. Брушлинский Н.Н. Совершенствование организации и управления пожарной охраной / Н.Н. Брушлинский, А.К. Микеев, Г.С. Бозуков и др. // Под ред. Н.Н. Брушлинского. – М.: Стройиздат, 1986. – 152 с.

35. Брушлинский Н.Н. Применение экономико-математических методов для решения организационно-управленческих задач пожарной службы / Н.Н. Брушлинский // Вопросы экономики в пожарной охране / Сб. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1972. – с.114-122.

36. Брушлинский Н.Н. Математическая модель расчета среднего радиуса выезда оперативных отделений пожарной охраны по вызовам / Н.Н. Брушлинский, Н.Н. Соболев // Пожарная техника и пожаротушение на объектах народного хозяйства / Сб. тр. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1986. – с. 58-66.

37. Бут В.П. Практичний посібник з пожежної тактики / В.П. Бут, Л.Б. Куціций, Б.В. Болібрух. – Львів: СПОЛОМ, 2003. – 122 с.

38. Васильев 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. -2014. - №5. -С. 106-113.

39. Валендик Э.Н. Ветер и лесной пожар. / Э.Н. Валендик. – М.: Наука, 1968. – 118 с.

40. Винарский М.С., Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.

41. Войтович Д.П. Підвищення ефективності функціонування пожежно-рятувальних підрозділів в процесі ліквідації пожежі / Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 / Д.П. Войтович – Львів: ДУ БЖД, 2011. – 20 с.

42. Гасіння пожеж на об'єктах зберігання і переробки деревини. Режим доступу: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=78447>.

43. Гасіння пожеж на складах лісоматеріалів. Режим доступу: <http://asyan.org/potrff/%D0%91%>.

44. Гулида Э.Н. Оптимизация размеров пожарных отсеков цехов деревообрабатывающих предприятий/ Гулида Э.Н., Коваль О.М. // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация.-2014.-№1(35).-С.55-63.

45. Гуліда Е.М. Вогнестійкість залізобетонних конструкцій скатних крівель одноповерхових будівель цехів деревообробних підприємств/ Гуліда Е.М., Коваль О.М.// Науковий вісник: НЛТУ України.-2014.-вип.№24.7.- С.166-180.

46. 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.

47. 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.

48. 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.

49. Гуліда Е.М. Вплив пожеж на екологічну безпеку навколишнього середовища / Е.М. Гуліда, А.А. Ренкас // Науковий вісник НГУ, № 5, 2014. С. 91-100.

50. Гуліда Е.М. Математична модель розповсюдження лісової пожежі за рахунок теплового випромінювання / Е.М. Гуліда, О.О. Карабин, О.О. Смотр. // Наук. зб. УкрНДІПБ, 2006, № 1 (13). – С. 24-30.

51. Гуліда Е.М. Вплив різних видів пожежного навантаження на димовиділення та на пониження концентрації кисню при пожежі в закритому приміщенні / Е.М. Гуліда. // Зб. наукових праць «Пожежна безпека». – 2014. - № 2. – С. 129-136.

52. Гуліда Е.М. Метод статистичного моделювання пожежі в приміщенні / Е.М. Гуліда, О.В. Меньшикова // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2010. – Вып.28. – С. 65-73.

53. Гуліда Е.М. Надійність технології гасіння пожежі на машинобудівних підприємствах / Е.М. Гуліда, І.О. Мовчан // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2004, № 2 (10). – С. 42-48.

54. Гуліда Е.М. Визначення показників надійності пожежної техніки методом статистичного моделювання / Е.М. Гуліда, І.О. Мовчан, Л.Ф. Дзюба // Зб. наукових праць «Пожежна безпека», 2006, № 8. – С. 116-121.

55. Гуліда Е.М. Зменшення тривалості вільного розвитку пожежі на основі оптимізації шляху слідування пожежних до місця її виникнення / Е.М. Гуліда. // Зб. наук. праць ЛДУ БЖД «Пожежна безпека», 2013. - № 23. – С. 64-70.

56. Гуліда Е.М. Надійність пожежної техніки для локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах / Е.М.Гуліда, О.М.Коваль О.М. // 12-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2015. – С.144-146.

57. 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.

58. Гуліда Е.М. Определение оптимальных размеров пожарных отсеков цехов для деревообрабатывающих предприятий / Е.М. Гуліда О.М.Коваль // VI международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». – Кокшетау: КТИ МЧС РК, 2015.-С.82-85.

58. Гуліда Э.Н. Управление надежностью цилиндрических зубчатых колес / Э.Н. Гуліда. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. Ун-те, 1983. – 136 с.

60. Гуліда Е.М. Прогнозування величини оптичної густини диму при пожежі в приміщенні / Е.М. Гуліда // Збірник наукових праць «Пожежна безпека» №18, 2011 / Львів: ЛДУ БЖД. – С. 65-70.

61. Гуліда Е.М. Прогнозування пожеж на підставі статистики їх виникнення. / Е.М. Гуліда, В.І. Заплава, Д.О. Крутінь // Проблеми пожежної безпеки, Вип. 22. - Харків, УЦЗ України, 2007. – С. 70-76.

62. Гуліда Е.М. Методика визначення соціального пожежного ризику в приміщеннях навчальних закладів / Е.М. Гуліда, І.О. Мовчан, Т.М. Кіт // Науковий вісник НЛТУ України, – 2014, – Вип. 24.11. – С. 139-149.

63. Гуліда Е.М. Оптимізація технології пожежогасіння на машинобудівному підприємстві / Е.М. Гуліда, І.О. Мовчан, Д.П. Войтович // Пожежна безпека, № 4, 2004. – С. 92 – 98.

64. Гуліда Е.М. Вибір оптимального варіанту технологічного процесу гасіння пожежі на машинобудівних підприємствах / Е.М. Гуліда, І.О. Мовчан // Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції „Науковий потенціал світу ‘2004”. Т. 62, Технічні науки. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – С. 55 – 59.

65. Гуліда Е.М. Надійність технології гасіння пожежі на машинобудівних підприємствах / Е.М. Гуліда, І.О. Мовчан // Науковий вісник УкрНДІПБ, №2 (10), 2004. – С. 42 – 48.

66. Горіння деревини. – Режим доступу: <http://kyrator.com.ua/index.php>.

67. ГОСТ 2292-88. Лесоматериалы круглые. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 9 с.

68. Гусев В.Г. О методе расчета скорости распространения лесного низового пожара / В.Г. Гусев, И.Ю. Корчунова // Сб. науч. тр. «Лесные пожары и борьба с ними». – Ленинград: ВИНТИ, 1986. – С. 31-50.

69. 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.

70. Даниленко А.С. Исследование факторов, влияющих на значение противопожарных разрывов на открытых складах грубых кормов до смежных зданий и сооружений. / А.С. Даниленко // Дис. канд. техн. наук. – М.: ВИПТШ, 1975.

71. ДБН В.2.5-56:2015 «Системи протипожежного захисту», 2014. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – 185 с.

72. ДБН В.2.5-56:2015 Системи протипожежного захисту. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. – 185 с.

73. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

74. Девлишев П.П. Исследование кинетики пожара на моделях / П.П. Девлишев // Пожарная наука и техника: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1977. – С. 178-208.

75. Демидов П.Г. Горение и свойства горючих веществ / П.Г. Демидов, В.А. Шандыба, П.П. Щеглов. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

76. Державні стандарти України (збірник). Пожежна безпека, Продукція протипожежного призначення. – К.: Пожінформтехніка, 2000. – 640 с.
77. Дзюба Л.Ф. Основи надійності машин / Л.Ф. Дзюба, Ю.В. Зима, Є.М. Лютий. – Львів: Логос, 2003. – 204 с.
78. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
79. Добровольський В.В. Екологічна безпека і ризик: деякі понятійно-категоріальні уточнення / В.В. Добровольський // Екологічна безпека. – 2011. - № 1. – С. 17-20.
80. Дорогунцов С. Ризик надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. / С. Дорогунцов, О. Бутрим // Економіка України. – 2001. – № 4. С. 68-73.
81. Доррер Г.А. Математические модели лесных пожаров: основные понятия, классификация, требования / Г.А. Доррер, Н.П. Курбатский // Прогнозирование лесных пожаров. Сб. науч. тр. – Красноярск, 1978. – С. 5-26.
82. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров / Г.А. Доррер. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 161 с.
83. Драздейл Д. Введение в динамику пожаров. / Д. Драздейл. – М.: Стройиздат, 1988. – 340 с.
84. ДСТУ Б В.1.1-18:2007. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги. – К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 13 с.
85. ДСТУ 2302-93 Батареї акумуляторні свинцеві стартерні. Приймання до ремонту і видача. – К.: Держстандарт України, 2000. – 18 с.
86. ДСТУ 3760:2006. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій (ISO 6935-2:1991, NEQ). – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 28 с.

87. ДСТУ Б.В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. – К.: Мінбуд України, 2006. – 14 с.
88. Єлагін Г.І. Основи теорії розвитку і припинення горіння / Г.І. Єлагін, М.Г. Шкарабура, М.А. Кришталь, О.М. Тищенко. – Черкаси: ЧПБ, 2001. – 448 с.
89. Заходи щодо попередження розповсюдження пожежі. Режим доступу: <http://studentbooks.com.ua/content/view/1344/76/1/5/>.
90. Зверев В.Г. Математическое моделирование аэродинамики и тепломассопереноса при распространении вершинных лесных пожаров. / В.Г. Зверев // Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Томск: ТГУ, 1985. – 24 с.
91. Иванов И.А. Определение скорости распространения пламени по штабелям лесобирж / И.А. Иванов // Пожарная профилактика: Информ. сб. – М.: Стройиздат, 1977, вып. 11. – С. 84-92.
92. Иванников В.П. Справочник руководителя тушения пожара / В.П. Иванников, П.П. Ключ. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
93. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
94. Исследование пожаров на моделях / Под ред. Комова В.Ф. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1969. – 152с.
95. Калиновский А.Я. Модель распространения ландшафтного пожара с учетом изменения влажности горючего материала / А.Я. Калиновский, А.П. Созник // Науковий вісник будівництва. – 2005. – Вип. 31. – С. 291-295.
96. Калиновський А.Я. Модель поширення ландшафтної пожежі з урахуванням флуктуацій вітру і вологості пального матеріалу / А.Я. Калиновський, А.П. Сознік // Пожежна безпека. – 2005. – Вип. 6. – С. 25-28.
97. Каталог деревообробних підприємств України. – Режим доступу: <http://www.rada.com.ua/Ukr/catalog>.
98. Кимстач И.Ф. Организация тушения пожаров в городах и населенных пунктах / И.Ф. Кимстач. – М: Стройиздат, 1997. – 142 с.

99. Класифікація твердих горючих матеріалів (ТГМ). – Режим доступу: <http://nuczu.edu.ua/material/avtomat/ukr/lessons/1/6.html>.

100. Климась Р. Статистика пожеж на деревообробних підприємствах за 2012-2013 роки / Р. Климась. – К.: УкрНДЦЗ, 2013. – 2 с.

101. Климась Р. Статистика пожеж на деревообробних підприємствах за 2014 рік / Р. Климась. – К.: УкрНДЦЗ, 2014. – 1 с.

102. Климась Р. Аналіз стану з пожежами в Україні за 2014 рік / Р. Климась, А. Одинець. // Пожежна та техногенна безпека, № 2 (17), 2015. С. 23-26.

103. Климась Р. Статистика пожеж на деревообробних підприємствах за 2011 і 2012 роки / Р. Климась. – К.: УкрНДЦЗ, 2013. – 5 с.

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

105. 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.

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

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

108. Коваль А.М. Скорость распространения фронта пожара на открытых складах круглых лесоматериалов штабельного хранения/Коваль О.М.//Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация.-2015.-№1.- С.66-78.

109. Коваль.О.М. Математична модель вибору оптимальної тактики гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств/ Коваль

О.М., Е.М. Гуліда // Науковий вісник: НЛТУ України.-2015.-вип.№25.5.- С.307-320.

110. Коваль О.М. Визначення критерія прийняття рішення для оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах /Коваль О.М.// Науковий вісник:НЛТУ України.-2015. - Вип. №25.4. - С. 345-352.

111. 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.

112. 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.

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

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

115. 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. №26.6. - С. 272-279.

116. 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. – К.: ДСІВ України.

117. Коваль О.М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 61687 «Комп'ютерна програма для вибору оптимального варіанту тактики



локалізації і гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств» / О.М. Коваль – заявник та власник свідоцтва. // Дата реєстрації 15.09.2015. – К.: ДСІВ України.

118. Коваль О.М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 63480 «Комп'ютерна програма для вибору оптимального варіанту тактики локалізації і гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів» / О.М. Коваль. // Дата реєстрації 11.01.2016. – К.: ДСІВ України.

119. Коваль О.М. Обоснование применения пожарных отсеков в цехах деревообрабатывающих предприятий / О.М. Коваль // IV Міжнародної науково-практичної конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси: ІПБ, 2014. – С.65-68.

120. 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.

121. 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». – Харків: НУЦЗ, 2015.- С. 3.

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

123. 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.3.

124. 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. 3.

125. 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.

126. 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.

127. 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. – К.: ДСІВ України.

128. 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. – К.: ДСІВ України.

129. Коваль О.М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68450 «Комп'ютерна програма для визначення кількості всіх необхідних засобів протипожежного захисту об'єкта» / О.М. Коваль – заявник та власник свідоцтва. // Дата реєстрації 20.11.2016. – К.: ДСІВ України.

130. Когут М.С. Механоскладальні цехи та дільниці у машинобудуванні / М.С. Когут. – Львів: Вид-во ДУ «Львівська політехніка», 2000. – 352 с.
131. Комяк В.А. Геометрическое моделирование в прогнозах динамики развития лесного пожара / В.А. Комяк, Н.Я. Откидач, С.А.Шило // Проблемы пожарной безопасности. – 1999. – Вып. 5. – С. 124-127.
132. Комяк В.А. Геометрическое моделирование в прогнозах динамики развития лесного пожара для неоднородного слоя / В.А. Комяк, Р.Л. Покровский // Проблемы пожарной безопасности. – 2001. – С. 77-80.
133. Копылов Н.П. О влиянии ветра на величину тепловых потоков от пламени открытого пожара / Н.П. Копылов, Г.М. Гроздов // Пожарная профилактика: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1980, Вып. 16. – С. 68-73.
134. Копылов Н.П. Моделирование пожаров на складах лесоматериалов. / Н.П. Копылов // Моделирование пожаров и взрывов. – М.: Изд. «Пожнаука», 2000. – С. 189-197.
135. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
136. Кудин А.И. Обзор критериев принятия решения для целей создания оперативного плана тушения пожаров в резервуарных парках / А.И. Кудин, В.И. Пермяков // Тез. докл. 51-й НТК. – Харьков: ХГТУСА, 1996. – с. 73.
137. Кудин А.И. Организация базы знаний для экспертной системы принятия решения при тушении пожаров с нефтепродуктами / А.И. Кудин, В.И. Пермяков // Проблемы пожежної безпеки. – К.: МВС України, 1995. – С. 244-245.
138. Кудін А.І. Розроблення експертної системи прийняття рішень при організації гасіння пожеж / А.І. Кудін // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харків: ХІПБ, 1997. – 18 с.

139. Курбатский О.М. Результаты исследования тушения пожаров лесобирж / О.М. Курбатский // Вопросы пожаротушения и пожарной профилактики: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1959. – С. 41-52.

140. Курбатский О.М. Тушение пожаров на складах лесопиломатериалов / О.М. Курбатский, И.И. Петров // Успехи пожарной науки и техники: Сб. науч. тр. – М.: Стройиздат, 1967. – С. 60-66.

141. Кимстач И.Ф. Пожарная тактика / И.Ф. Кимстач, П.П. Девлишев, Н.М. Евтюшкин. – М.: Стройиздат, 1984. – 590 с.

142. Кимстач И.Ф. Организация тушения пожаров в городах и населенных пунктах. – М.: Стройиздат, 1997. – 142 с.

143. Корнякова Н. О. Нормативно-правове регулювання поведження з відходами за законодавством України // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Юридичні науки. - Випуск 59. – С. 170-173.

144. Корнякова Н. О. Юридичне визначення поняття та видів відходів за законодавством України // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Юридичні науки. – Випуск 58. – С. 123-126.

145. Коробкин В.И. Экология и охрана окружающей среды / В.И. Коробкин, Л.В. Передельский. – Ростов н/Д: Кнорус, 2014. – 336 с.

146. Кругляк в Україні. Купити. Ціна. - Режим доступу: <http://woodex.ua/ru/trade/list/c28>.

147. Копиленко М.Э. Моделирование реальных пожаров в помещениях: проблемы и решения / Промышленная теплотехника: [международный научно-прикладной журнал]. – Том 23, № 1-2 – К.: 2001. – С. 16-20.

148. Копиленко М.Э. Моделирование огнестойкости элементов строительных конструкций в условиях реального пожара / Копиленко М.Э., Круковский П.Г., Картавова Е.С. // Промышленная теплотехника:

[международный научно-прикладной журнал]. – Том 21, № 4-5 – К.: 1999. – С. 16-21.

149. Крайнюк О.І. Підходи до визначення місць дислокації та площі обслуговування підрозділів місцевої пожежної охорони. / О.І. Крайнюк // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2008, № 2 (18). – С. 180-185.

150. Кіндрацький Б.І. Раціональне проектування машинобудівних конструкцій / Б.І. Кіндрацький, Г.Т. Сулим. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2003. – 279 с.

151. Лыков А.В. Тепломассообмен: [Справочник] / Лыков А.В. – М.: Энергия, 1978. - 480 с.

152. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (Приложение к приказу МЧС РФ от 30.06.2009 № 382). – М.: МЧС РФ, 2009. – 10 с.

153. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций – М.: ГУП «НИИЖБ», 2000 – 92 с.

154. Мовчан І.О. Визначення прогнозованого часу гасіння пожежі на промислових підприємствах / І.О. Мовчан, Е.М. Гуліда, Д.П. Войтович // Проблеми пожежної безпеки. – Вип. 21 – Харків: УЦЗУ, 2008. – С. 241-247.

155. Мовчан І.О. Забезпечення надійності технології гасіння пожежі на машинобудівному підприємстві / Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 / І.О. Мовчан – Харків: УЦЗУ, 2007. – 20 с.

156. Мовчан І.О. Визначення ризику евакуації людей із будівель та споруд у випадку пожежі з урахуванням її критичного часу / І.О. Мовчан, Е.М. Гуліда // Вісник ЛДУ БЖД: збірник наукових праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2012. – № 6. – С. 157-161.

157. Мовчан І.О. Вибір критеріїв для прийняття рішень в системі пожежогасіння / І.О. Мовчан, М.І. Васильєв // Вісник Львівського

державного університету безпеки життєдіяльності № 8. – Львів: ЛДУ БЖД, 2013. – С. 146-154.

158. Мовчан І.О. Оптимізаційна модель протипожежного захисту міста для допустимого значення пожежного ризику / І.О. Мовчан, М.І. Васильєв, Е.М. Гуліда // Пожежна безпека № 22. – Львів: ЛДУ БЖД, 2013. – С. 65-71.

159. Мушик Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер // Перевод с нем.. – М.: Мир, 1990. – 208 с.

160. Надежность и эффективность в технике // Справочник в 10 Т. Т.7 //Под редакцией И.В. Апполонова .- М.: Машиностроение, 1989. – 280с.

161. Напрямки протидимного захисту і його реалізація. Режим доступу: <http://nuczu.edu.ua/material/avtomat/ukr/lessons/14/2.html>.

162. Научно-технический прогресс в пожарной охране / Д.И. Юрченко, Ю.Ф. Аверин, А.В. Антонов и др; Под ред. Д.И. Юрченко. – М.: Стройиздат, 1987. – 376 с.

163. Нефедов Н.А. Имитационная модель оперативно-тактической деятельности пожарной охраны крупнейших городов / Н.А. Нефедов, С.В. Белан // Рукоп. депон. в ГНТБ Украины, №242, 1997. – 21 с.

164. Никонов С.А. Исследование структуры и обоснование компонентов 1-ой очереди САПР «Пожарная безопасность» / С.А. Никонов, Т.Б. Боровикова, М.В. Шишков // Системные исследования проблем пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СРСР, 1990. – С. 94-101.

165. Носовський Т.А. Технологія лісопильно-деревообробних виробництв / Т.А. Носовський, Р.І. Мацюк, В.В. Маслій. – К.: НМК ВО, 1993. – 196 с.

166. Нормативи по пожежно-стройовій підготовці. – К.:УДПО МВС України, 1995. – 14 с.

167. Об'ємно-планувальні рішення з забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд. Режим доступу: <https://www.google.com.ua/webhp>.

168. Огляд стану організації пожежогасіння, пожежно-рятувальних робіт, застосування пожежної та спеціальної техніки ПРП МНС України у 2005 році. – К.: Департамент ЦЗ МНС України, 2005. – 31 с.

169. Озарків І.М. Основи мокрого очищення газів / І.М. Озарків, Г.В. Сомар, І.А. Соколовський та інші. // Науковий вісник: НЛТУ України. - 2016. - Вип. №26.4. - С. 230-233.

170. Озарків І.М. Фізичні закономірності мокрого вловлювання газопилових потоків / І.М. Озарків, Ю.Р. Дадак, Р.М. Дадак. // Науковий вісник: НЛТУ України. - 2014. - Вип. №24.10. - С. 103-106.

171. Озарків І.М. Основи техноекології / І.М. Озарків, Й.С. Мисак, М.П. Кірик та ін. – Львів: НВФ «Українські технології», 2009. – 336 с.

172. Озарків І.М. Закономірності переміщення подрібнених матеріалів у циклонах / І.М. Озарків, Г.В. Сомар, І.А. Соколовський Ю.Р. Дадак // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів: НЛТУ України. – 2013. – С. 121-126.

173. Оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей. – Режим доступу: <http://sota.org.ua/ua/systemy/soundfire>.

174. Определение категории помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности (ОНТП 24—86). – Режим доступу: <http://www.dnaop.com/html>.

175. Оцінка і напрямки зменшення загроз біорізноманіттю України. – К.: Вид-во «Хімджест», 2003. – 399 с.

176. Пархоменко Р.В. Пожежна тактика / Р.В. Пархоменко, Б.В. Болібрух, Д.О. Чалий. – Кам'янець-Подільський: ПП «Медобори-2006», 2013. – 416 с.

177. Паснак І.В. Підвищення ефективності ліквідації пожеж класу А і В на промислових підприємствах / Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 / І.В. Паснак – Львів: ДУ БЖД, 2012. – 20 с.

178. Перелік внесених змін до управління системами протипожежного захисту. Режим доступу: [www.usptb.org/upload/.../fls/1349856892.docx](http://www.usptb.org/upload/.../fls/1349856892.docx).

179. Пермяков В.И. Перспективы разработки и применения экспертных систем при тушении пожаров / В.И. Пермяков, А.И. Кудин // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: МВД Украины, 1993. – С. 293-296.
180. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении / И.И. Пляскин. – М.: Машиностроение, 1982. – 176 с.
181. Повзик Я.С. Пожарная тактика / Я.С. Повзик, П.П. Ключ, А.М. Матвейкин. – М.: Стройиздат, 1990. – 335с.
182. Пожежа на території ТОВ «Свіспан-Лімітед» в м. Костопіль. – Режим доступу: <http://www.youtube.com/watch>.
183. Пожежа на деревообробному підприємстві «Клен». Режим доступу: <http://zakarpattya.net.ua/News/>.
184. Покровский Р.Л. Раннее обнаружение очагов ландшафтных пожаров и прогноз динамики их распространения / Р.Л. Покровский // Автореф. дисс...канд. техн. наук. – Харьков: АГЗУ, 2002. – 20 с.
185. Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона к СТО 36554501-006-2006. – М.: 2008. – 134 с.
186. Посацький С.Л. Опір матеріалів. / С.Л. Посацький. – Львів: Вид-цтво Львівського ун-та, 1973. – 403 с.
187. Повзик Я.С. Аналитическое определение времени боевого развертывания пожарных подразделений / Я.С. Повзик, Н.С. Артемов, В.П. Торбнев // Пожарная техника и пожаротушение на объектах народного хозяйства. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1986. – с. 7-9.
188. Призначення противодимного захисту. Режим доступу: <http://nuczu.edu.ua/material/avtomat/ukr/lessons/14/1.html>.
189. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях. – М.: МЧС РФ, ВНИИПО, 2001. – 21 с.
190. Проблеми проектування систем інженерного забезпечення – безпека життєдіяльності. Режим доступу: <http://8ref.com/8/referat>.



191. Проект технологічного процесу лісосклад. Режим доступу: <http://bukvar.su/promyshlennost-proizvodstvo/89123>.

192. Проект ДСТУ-Н П Б В.2.6-ХХ: 20ХХ. Настанова проектування залізобетонних конструкцій. Основні положення. Вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004 MOD).

193. Пронин Д.Г. Деление зданий на пожарные отсеки по высоте в свете Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» / Д.Г. Пронин // Пожаровзрывобезопасность, № 7, 2009. – С. 25-26.

194. Пронин Д.Г. Обоснование размеров пожарных отсеков. // Автореф. канд. дис. – М.: ФГУ ВНИИПО, 2011. – 21 с.

195. Проников А.С. Надежность машин. / А.С. Проников – М.: Машиностроение 1978. – 592 с.

196. Протипожежні перешкоди та захист отворів у них. Режим доступу: <http://westudents.com.ua/glavy/3563-463-protipojejn-pereshkodi>.

197. Пузач С.В. Новые представления об очередности наступления опасных факторов пожара во время эвакуации людей из здания / С.В. Пузач, О.С. Лебедченко, А.В. Смагин // Химическая и биологическая безопасность. 2007. № 4-5 (34-35). – С. 14-21.

198. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

199. Рекомендации по использованию программы FDS с применением программ PyroSim2012, SmokeView и «СИТИС: Фламмер». – Екатеринбург: «Ситис», 2012. – 170 с.

200. Рекомендации по тушению пожаров на открытых складах лесоматериалов. - М.: ВНИИПО МВД России, 1995.- 76 с.

201. Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций – М.: НИИЖБ, 1986. - 40 с.

202. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром – М.: Стройиздат, 1987. – 75 с.

203. Ренкас А.А. Методи забезпечення вогнестійкості залізобетонних плит перекриття житлових будівель з урахуванням умов реальної пожежі. / А.А. Ренкас // Дис. канд. техн. наук. – Львів: ЛДУ БЖД, 2014. – 20 с.

204. Ренкас А.А. Стойкость железобетонных плит перекрытия после неравномерного прогрева во время пожара / А.А. Ренкас, Э.Н. Гулида // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация [научно-технический журнал], № 2(34). – Минск: НИИПБ и проблем чрезвычайных ситуаций, 2013. – С. 40-46.

205. Ренкас А.А. Врахування реального розподілу температури при пожежі та його вплив на залишкову міцність залізобетонних плит перекриття / А.А. Ренкас, Е.М. Гуліда // Пожежна безпека: Збірник наукових праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2013. – № 23. – С. 131-138.

206. Решетов Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.

207. Романычева Н.Н. К оценке деятельности структурных звеньев пожарной охраны / Н.Н. Романычева, С.Н. Минаев, О.В. Августинович // Вопросы экономики в пожарной охране / ВНИИПО МВД СССР, 1977, вып. 7. – с. 61-66.

208. Рыбальский Н.Г. Экология и безопасность (справочник) / Н.Г. Рыбальский, М.А. Малярова, В.В. Горбатовский, В.Ф. Рыбальская. – М.: ВНИИПИ, 2006. - Т. 1: Безопасность человека, Ч. 1. - 319 с.

209. Рыжов А.М. Дифференциальный (полевой, CFD) метод моделирования пожаров. / А.М. Рыжов А.М. // Моделирование пожаров и взрывов. – М.: Пожнаука, 2000. – С. 25-88.

210. Савченко О.В. Модель гасіння пожежі постійної площі з урахуванням часу повторного займання, кількісного та якісного складу горючого завантаження / О.В. Савченко, О.О. Кіреєв, А.Я. Шаршанов. //

Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: УГЗУ, 2007. – Вып. 22. С. 161-165.

211. Садковой В.П. Экспрес-решение прямой и обратной задач пожаротушения / В.П. Садковой. // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: УГЗУ, 2007. – Вып. 22. С. 166-169.

212. Самошин Д.А. Расчет пожарных рисков для общественных, жилых и административных зданий / Д.А. Самошин – 46 с – Режим доступа: <http://www.akademygps.ru>.

213. Системный анализ и проблемы пожарной безопасности народного хозяйства / Н.Н. Брушлинский, В.В. Кафидов, В.И. Коргачков и др: Под ред. Н.Н. Брушлинского. – М. Стройиздат, 1988. – 413с.

214. Системи оповіщення та управління евакуацією. – Режим доступа: <http://www.vellez.ua/uk/souerus.htm>.

215. Склад круглих лісоматеріалів. Режим доступа: <http://sheplis.com.ua/fotogalereja/fotogalereja-2015-roku.html>.

216. Склад пиломатеріалів. Режим доступа: <http://ua.112.ua/avarii-np/ukharkovi-stalasia-pozhezha-na-derevoobrobnomu-pidpriemstvi-230959.html>.

217. Смагин А.В. Моделирование выделения и распространения токсичных газов при пожарах в зданиях и сооружениях для обоснования их объемно-планировочных решений с целью обеспечения безопасной эвакуации людей // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М: Академия ГПС МЧС России, 2008. – 24 с.

218. Снегирев А.Ю. Численное моделирование турбулентной конвекции в помещении при наличии очага пожара. / А.Ю. Снегирев А.Ю., Л.Т. Танклевский. // Теплофизика высоких температур. – 1998. – Т. 36, № 6. – С. 973-983.

219. Снегирев А.Ю. Численное моделирование диффузионного турбулентного горения при различных режимах пожара в помещении. / А.Ю. Снегирев, Г.М. Махвиладзе, Дж. Робертс. // Труды II Российской

национальной конференции по теплообмену. - М.: МЭИ, 1998. – Т. 3. – С. 273-276.

220. СНиП 21-03-2003. Склады лесных материалов. Противопожарные нормы РФ. – М.: «Пожарный Центр», 2003. – 18 с.

221. СП 2.13130.2012 Свод правил системы противопожарной защиты «Обеспечение огнестойкости объектов защиты». – М.: МЧС России, 2012. – 46 с.

222. Созник А.П. Геометрическая модель движения кромки низового лесного пожара / А.П. Созник // Проблемы пожарной безопасности. -2002. – Вып. 11. – С. 188-191.

222. Солонин И.С. Математическая статистика в технологий машиностроения. / И.С. Солонин. - М.: МАШГИЗ, 1960. – 176 с.

224. Сповіщувач пожежний ручний. Режим доступу: <http://www.tiras.ua/uk/product/spr-t-ras>.

225 Страхов В.Л. Оптимальное проектирование огнестойких строительных конструкций // Моделирование пожаров и взрывов / Под. Общ. ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченка. – М.: Ассоциация «Пожнаука», 2000. - С. 365-446.

226. Тарахно О.В. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі / О.В. Тарахно, А.Я. Шаршанов. – Харків: ТОВ, 2004. – 252 с.

227. Туркин Б.Ф. Автоматизированная система управления пожарной охраной крупного административного центра / Б.Ф. Туркин, Г.В. Денисов // Пожарная профилактика.; – М.; ВНИИПО. 1980. – №16. – С. 144-153.

228. Умови виникнення і основні характеристики процесу горіння. – Режим доступу: <http://lektsii.net/2-56638.html>.

229. Уніфікована типова секція (УТС). Режим доступу: <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-181.../316.ht>.

230. Условия хранения пиломатериалов. Режим доступу: <http://brigadeer.ru/stadii-proizvodstva/xranenie-drevesiny.html>.

231. Федоров А.И. Оценка максимальной температуры в помещении на начальной стадии пожара / А.И. Федоров, О.Е. Безуглов // Проблемы пожарной безопасности. – Вып. 27. – К.: 2010. – С. 221-225.

232 Федоров В.С. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций / В.С. Федоров, В.Е. Левитский, И.С. Молчадский, А.В. Александров. – М.: АСВ, 2009. – 408 с.

233. Фомин С.Л. Методика численного определения температурных полей в железобетонных конструкциях при пожаре. / С.Л. Фомин // Республиканский межведомственный сб. «Коммунальное хозяйство городов», Вып. 9. – К.: Техника, 1997. – с. 57-58.

234. Ференц О.Б. Технологія столярних виробів / О.Б. Ференц, В.М. Максимів. – Львів: НЛТУ України, 2011. – 400 с.

235. Хлобыстов Е. Экологическая безопасность и основы определения риска техногенных катастроф / Е. Хлобыстов. // Экономика Украины, № 6. – 2000. – С. 38-46.

236. Холщевников В.В. Проблемы оценки безопасности людей при пожаре в уникальных зданиях и сооружениях / В.В. Холщевников // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – № 4. – С. 21-27.

237. Христич В.В. Системи пожежної та охоронної сигналізації / В.В. Христич, О.А. Дерев'янку, С.М. Бондаренко, О.А. Антошкін. – Харків: Академія ПБ України, 2005. – 87 с.

238. Цапко Ю.В. Визначення ефективності вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів / Ю.В. Цапко // Зб. наук. праць. – Львів: ЛІПБ, 2005, № 7. – С. 132-134.

239. Чебан Т. М. Сучасний стан та перспективи механізму правової охорони рекреаційних територій України / Т. М. Чебан // Актуальні проблеми вдосконалення чинного законодавства України. - 2010. - Вип. 23. - С. 177-183. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/apvchzu\\_2010\\_23\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/apvchzu_2010_23_27).

240. Чернуха А.М. Визначення усередненого часу вільного розвитку пожежі у населених пунктах / А.М. Чернуха, Т.Ю. Поляк // Проблеми пожежної безпеки. – Вип. 21. – Харків: УЦЗУ, 2007. – С. 297-300.
241. Шараварников А.С. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.С. Шараварников, В.П. Молчанов, С.С. Воевода, С.А. Шараварников. – М.: Калан, 2002. – 448 с.
242. Шевчук А.П. Проблемы количественной оценки пожарного риска / А.П. Шевчук, В.А. Иванов, А.А. Косачев // Пожаровзрывобезопасность. – 1994. – №1. – с. 42-48.
243. Шеннон Р. Имитационное моделирование – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
244. Шерешевский И.А. Конструирование промышленных зданий и сооружений. / И.А. Шерешевский. – М.: «Архитектура-С», 2005. – 168 с.
245. Шмаль А.Г. Факторы экологической безопасности – экологические риски. – Бронницы: МП «ИКЦ БНТВ, 2010. – 192 с.
246. Шмаль А.Г. Основы общей экологии. – Бронницы: МП «ИКЦ БНТВ, 2012. – 341 с.
247. Яковенко Ю.Ф. Техническая диагностика пожарных автомобилей / Ю.Ф. Яковенко, Ю.С. Кузнецов. - М.: Стройиздат, 1989. с. 289.
248. Як виміряти обсяг лісоматеріалу? - Режим доступу: <http://denisa.com.ua/yak-vymiryaty-obsyah-lisomaterialu/>.
249. Ярчак В. Про екологічний ризик джерел підвищеної екологічної небезпеки / В. Ярчак // Вісник Львів. ун-ту. – 2009. Вип. 48. – С. 209-215.
250. Blanchard Ben S. Cost effectiveness, integrated logistics support and maintainability // IEEE transaction ob reliability, 1967, v. R – 16, №3. – P. 117-126.
251. Burning velocities and flammability limits of gaseous mixtures at elevated temperatures and pressures / Shebeko Yu.N., Tsarichenko S.G., Korolchenko A.Ya. et al. // Combustion and Flame. - 1995. - Vol. 102. -3/4. - P. 427-437.

252. Butcher E.G., Parnell A.C. Analysis of fire Behaviour // A review Fire Superior, 1985, v. 14, №3. – p. 27-32.

253. Calea E.R., Markatos N.C. Forced and natural venting of aircraft cabin fires-a numerical simulation. //Aircraft Fire Safety: Pap. Propul. and Energ. Panel 73rd Symp., Sintra, 22-26 May, 1989/NATO Advis. Group. Aerosp Res. and Dev.- Seattle (Wash.), 1989. - P. 1-18.

254. Carter G., Chaiken I., Ignall E. Simulation model of fire department operation: design and preliminary results // IEEE Transportation System Science and Cybernetics, 1970, №40. – P. 282-293.

255. Chen Xiaojun, Yang Lizhong, Deng Zhihua, Fan Weicheng. A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a fire room. –Fire Safety Journal 40 (2005) – P. 267–281. // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.elsevier.com/locate/firesaf>.

256. Cooper L.Y. A program for the development of a benchmark compartment fire model computer code. / L.Y. Cooper, J.A. Rockett, H.E. Mitler, D.W. Stroup // Math. Model. Fires. – Philadelphia (Pa), 1988. – P. 116-127.

257. Cox G. Hydrodynamics and heat transfer in enclosures containing a here source. / G. Cox, N.C. Markatos // Physico-chemical Hydrodynamics, 1984. - № 5. – P. 53.

258. Cox G. Some field model validation studies. / G. Cox, S. Kumar, N.S. Markatos // Proceedings of the First International Symposium on Fire Safety Science, Hemisphere, 1986. – P. 159.

259. Cox G. Field Modeling of Fire in Forced ventilated Enclosures. / G. Cox, S. Kumar // Comb. Sci. and Tech., 1987, Vol. 52. – P. 7-23.

260. Computational modeling for fires. (2016). // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.uwaterloo.ca/fire>.

261. De Marco A.G., Lockwood F.C. A new flux model for the calculation of radiation in furnaces // Riv. combust. - 1975. - Vol. 29, 5/6. - P. 184-196.

262. Desoky A.A., Abdel-Ghafar Y.A., El-Badrawy R.M. Hydrogen, propane and gasoline laminar flame development in a spherical vessel // Hydrogen Energy. - 1990. - Vol. 15. - X°12. - P. 895-905.
263. EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire.
264. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.
265. Essentials of fire fighting. – Oklahoma: Fire protection publications, 1983. - 410 p.
266. Fire Modeling in CFD - Nafems. (2016). // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nafems.org/>.
267. Fire Fighting Tactics & Decision Making In Lightweight Construction. (2016) // [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.fvfpd.com/.../FF Tactics Decisio](http://www.fvfpd.com/.../FF_Tactics_Decisio).
268. Forney G.P. Analyzing and Exploring Numerical Characteristics of Zone Fire Models / G.P. Forney, W.F. Moss. // Fire Science and Technology, 1994. – Vol. 14. - № 1, 2. – 49-59.
269. Galea E.R. A general approach to validating evacuation models with an application to  $v$  / EXODUS. // Journal of Fire Sciences, 1998, v.16, N 6. - P. 414-436.
270. Goderedson J. Computer technologies an aid to fire brigades within Australia // Fire, v. 84, №1032, 1991. – P. 21, 23-24.
271. Holmes, A. (2011). Risk management challenges for complex infra projects. / Infrastructure Journal Supporting Infrastructure Investment. British Consulting. // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.britishconsulting.com/en/i.journal-aug-2011-risk-management.pdf>.
271. Holmes, A. (2011). Risk management challenges for complex infra projects. / Infrastructure Journal Supporting Infrastructure Investment. British Consulting. // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.britishconsulting.com/en/i.journal-aug-2011-risk-management.pdf>.



272. 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.

273. Hulida E.M. Reliability of technology of fire extinguishing at the machine-building enterprises / E.M. Hulida, I.O. Movchan // International scientific-practical conference Fire protection 2004. - Czech Republic: Technical University of Ostrava, 2004. - P. 10 - 14.

274. Hulida E.M. About some features of the organization of struggle against mounnains forest fires / E.M. Hulida, I.O. Movchan // International scientific-practical conference Fire protection 2004. - Czech Republic: Technical University of Ostrava, 2004. – P. 14 – 16.

275. Hyde S.M., Moss J.B. Field modelling of carbon monoxide production in fires. // IN- TERFLAM'99, 1999. - P. 951-962.

276. Intervention and Rescue Tactics. // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ni.ac.rs/...fire.../1986-intervention>.

277. Jia F., Galea E.R., Patel M.K. The prediction of fire propagation in enclosure fires. // Proc. of V Int. Symp. On Fire Safety Science, 1997. - P. 439-450.

278. Karim G.A., Panlilio V.P. Flame propagation and extinction within mixtures involving hydrogen and diluent inert gases // Hydrogen Energy. - 1993. - Vol. 18. - K 2. - P. 157- 162.

279. Khalil E.E., Truelove J.S. Calculation of radiation heat transfer in a large gas fired furnace // Lett. Heat and Mass Transfer. - 1977. - Vol. 4. - P. 353-365.

280. Kujime M., Matsushita T., Tanaka T. Hand Calculation method for air supply rates in vestibule pressurization smoke control system. // Inter. Jornal on Eng. Performance-Based Fire Codes, 1999, v.1, N1. - P. 27-40.

281. Kumar S. and Cox G. Mathematical modelling of fire in road tunnels - validation of JASMINE. // Transport and Road Research Laboratory Contractor: Report N 28, 1986.

282. Kumar S. Mathematical modeling of fire in road tunnels – validation of JASMINE. / S. Kumar, G. Cox // Transport and Road Research Laboratory Contractor, Report № 28, 1986

283. Lewis M.J. Field Modeling of Non-Charring Flame Spread. / M.J. Lewis, P.A. Rubini, J.B. Moss // Sixth International Symposium on Fire Safety Science, France, 1999.

284. Lie T.T., Stanzak W.W. Fire resistance of protected steel columns. // «Eng. J» (USA), 1973. - 10. - № 3. – P. 82-94.

285. Linkov I. (2006). From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent 306 developments and applications. Environment International 32, - P. 1072-1093.

286. Liu F., Yoshizawa Y. Combustion and flow of premixed lean hydrogen-air mixtures in the connected compartments // Hydrogen Energy. - 1998. - Vol. 23. - Jfe 5. - P. 373-380.

287. Lockwood F.C., Spalding D.B. Predictions of a turbulent reacting dust flow with significant radiation // Proc. Colloques d'Evian de la Soc. Franc de Phys. Thermodyn. Session. - 1971. - P. 49-55.

288. Lockwood F.C., Shah N.G. Evaluation of an efficient radiation flux model for furnace prediction procedures II Proc. 6-th Intern. Heat Transfer Conf. Toronto. - 1978. - Vol. 2. - P. 33-40.

289. Magnussen B.F., Hjertager H.B.. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. 16<sup>th</sup> Sump. (Int.) Combust. The Combustion Institute. Pittsburg, 1976.

290. Miles S.D. Comparison of «Blind Prediction» of a CFD Model with Experimental Data. / S.D. Miles, S. Kumar, G. Cox // Sixth International Symposium on Fire Safety Science, France, 1999.

291. Modeling Fire Hazard. (2016). // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.esri.com/news/arcuser/0700/files/firemodel.pdf>.

292. Modern House Fires: Effects of Research on Strategy and Tactics. (2016) // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.firerescuemagazine.com/.../strategy...tacti>.
293. Morita M. Numerical simulation of fire temperature stratified atrium with a mathematical field model. / M. Morita, Y. Yamauchi, A. Manmoto. // Fire Sci. and Technol., 1992, Vol. 12, № 1. – P. 23-27.
294. Muzy A. Cellular Automata Based Simulation for Smoke and Fire Spreading in Large Buildings / A. Muzy, E. Innocenti, A. Aiello, J.-F. Santucci, G. Wainer // Simulation. – 2005. – Vol. 81, no 2. – P. 103-117.
295. Norman J. Fire Officer's Handbook of Tactics. (2005). – PennWell: Fire Engineering. - 466 P. // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.books.google.com/books?isbn=159370061X>.
296. Novozhilov V., Moghtaderi B., Fletcher D.F., Kent J.H. Computational Fluid Dynamics Modelling of Wood Combustion. // Fire Safety Journal, 1996, v.27, N 1. - P. 69-84.
297. Novozhilov V. Computational fluid dynamics modeling of compartment fires. // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article>.
298. Ortlichkeit - Prinzihat Oberste Prioritat // Feuerwerhmann, №12, 1994. – S. 366-368.
299. Peacock R.D. CFAST the consolidated model of fire growth and smoke transport. / R.D. Peacock, G.P. Forneu, P. Reneke, R. Portier, W.W. Jones // NIST Technical Note 1299, NIST, U.S. Dept. of Commerce, Caitersburg, Maryland, U.S.A., 1993.
300. Puzach S.V. Effect of Supersonic Diffuser Geometry on Operation Conditions // Experimental Thermal and Fluid Science. - 1992. - Vol. 5, Ха 1. - P. 124-129.
301. Raycraft J. Fire spread in a three-dimensional pressure vessel with radiation exchange and wall heat losses. / J. Raycraft, V.D. Keller, H.Q. Yang, K.T. Yang // Math. And Comput. Modell., 1990. - № 14. – P. 795-800.

302. Satoh K. A numerical study of window-to-window propagation in high-rise building fires. / K. Satoh. // Rep. Fire Res. Inst. Jap., 1992, № 73. – P. 47-56.
303. Sullivan A.L. A review of wild land fire spread modeling, 1990-present. 2: Empirical and quasi-empirical models // arXiv:0706.4128v1 [physics.geo-ph]. 28 Jun 2007. – 32 p.
304. Spalding D.B. Older and newer approaches to the numerical modelling of turbulent combustion // 3-rd International Conference on Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines. - London: IMochE, 1996. - P. 25-37.
305. Sullivan A.L. A review of wild land fire spread modeling, 1990-present. 3: Mathematical analogues and simulation models // arXiv:0706.4130v1 [physics.geo-ph]. 28 Jun 2007. – 29 p.
306. Tanaka T. Proceedings CSSN Specialist Meeting on Interaction of Fire and Explosion with Ventilation System. Los Alamos, 1983. – 231 P.
307. Tarifa C.S. On the flight path and the lifetime of burning patches of wood / C.S. Tarifa, P.P. Notario, F.G. Moreno // 10-th Symposium (int.) on Combustion. – Pittsburgh, 1965. – pp. 1021-1037.
308. Viscanta R., Menguc M.P. Radiation heat transfer in combustion systems II Progr. Energy Combust. Sci. - 1987. - Vol. 13. - P. 97-160.
309. 9-th Water Reactor Safety Information Meeting. - Gaithersburg: INEL. - 1981. - 520 p.
310. Welch S., Rubini P. SOFIE: Simulation of Fires in Enclosures. User Guide. United Kingdom: Cranfield University. - 1996. - 340 p.
311. Williamson R.B. Coupling Deterministic and Stochastic Modeling to Unwanted Fire / Fire Safety Journal, №3, 1981. – P. 243-257.
312. World disasters report 2002. Focus on reducing risk / ed. By Walter Jonathan. London: international Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2002. – 240 p.
313. Woodburn P.J., Britter R.E. CFD Simulation of a Tunnel Fire. Part 1, Part 2. // Fire Safety Journal, 1996, v.26, N 1. – P. 35-90.

314. Wu Y., Bakar M. Z. Interaction of fire plume with inclined surface // Fire Safety Journal. 2000. V. J5. - P. 363-390.