

Національний університет цивільного захисту України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОВАЛЬ ОЛЕКСАНДР МИРОСЛАВОВИЧ

УДК 614.843

ДИСЕРТАЦІЯ

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

21.06.02 – пожежна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О. М. Коваль

Науковий консультант –

Гуліда Едуард Миколайович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2017

АНОТАЦІЯ

Коваль О. М. Розвиток наукових основ ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертаційна робота присвячена розвитку наукових основ ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах. Розглянуто основні конструктивні особливості приміщень цехів деревообробних підприємств та відкритих складів лісоматеріалів. Виконано моделювання з використанням польового методу прогнозування розповсюдження пожежі в закритих приміщеннях деревообробних цехів та її критичний час, який пов'язаний з можливістю евакуації людей.

Моделювання і прогнозування поширення пожежі виконували в умовах опоряджувально-складального цеху деревообробного підприємства (м. Самбір Львівської області, вул. В. Чорновола, 36). Загальна площа приміщень цеху – 14 256 м²; висота до ферм – 6 м; об'єм приміщень до ферм – 85 536 м³; довжина цеху з кроком колон 6 м – 192 м; ширина цеху – 72 м; пожежне навантаження – 200 кг/м². Розглянуто три пожежні ситуації: кругова пожежа в центрі цеху; кутова пожежа (180°) в центрі цеху; кутова пожежа (180°) в бічній частині цеху. Результати досліджень тривалості поширення пожежі в закритому приміщенні деревообробного цеху засвідчили, що залежно від місця виникнення пожежі вся площа цеху може бути охоплена пожежею в межах 15...33,4 хв.

За результатами цих досліджень було встановлено необхідність наявності в приміщенні цеху пожежних відсіків, які значно зменшують швидкість розповсюдження полум'я пожежі. Для цього вперше розроблено оптимізаційну математичну модель і пакет прикладних програм для визначення оптимальної кількості і площі пожежних відсіків в закритих приміщеннях деревообробних цехів. Наявність пожежних відсіків дозволяє зменшити швидкість розповсюдження пожежі в закритому приміщенні цеху в 1,8 разу.

Також з використанням графових моделей розглянуто прогнозування поширення пожежі на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємствах. Встановлено, що швидкість фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів за однакових умов приблизно в 3...3,5 разу більша від швидкості фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів. На швидкість фронту пожежі великою мірою впливає швидкість і напрям дії вітру. Результати аналізу графових моделей показали, що зі збільшенням швидкості вітру до 10 м/с 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 у 3,5 разу. Встановлено, що тривалість вільного розповсюдження пожежі залежить від місця її виникнення на кварталі складу. Найбільша тривалість вільного поширення пожежі спостерігалася при її виникненні на зовнішньому куті кварталу, а найменша – у центрі кварталу. Різниця в цьому випадку сягає до 2 разів.

Вперше розроблено математичні моделі для оптимізації вибору сил і засобів пожежогасіння під час ліквідації пожеж у закритих приміщеннях деревообробних цехів і на відкритих складах лісоматеріалу з урахуванням надійності системи пожежогасіння. За критерій оптимізації було взято збитки об'єкта від пожежі і втрати пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі. Ця сума в процесі розв'язування математичної оптимізаційної задачі повинна наближатися до мінімального значення. Результати досліджень показують, що із врахуванням надійності пожежної техніки її кількість необхідно збільшувати на 16,4%. Розроблені блок-схеми алгоритмів розв'язку моделей і написані програми дали змогу значно підвищити ефективність ліквідації пожеж. Також вперше розроблено математичні моделі оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж у цехах деревообробних підприємств і на відкритих складах лісоматеріалів, які базувалися на моделюванні та аналізі пожежних ситуацій. На їх основі написано програми, які можуть бути використані службами ДСНС України для розроблення планів пожежогасіння та для оперативного визначення першочергових завдань пожежно-рятувальним підрозділам для ліквідації пожежі.

Показано, що пожежі на відкритих складах лісоматеріалів впливають на екологічну безпеку. Встановлено, що вагомим чинником є швидкість вітру. Зменшення швидкості вітру при пожежі, наприклад, у два рази, зменшує об'єм розповсюдження продуктів горіння приблизно удвічі і в деяких випадках через збільшення концентрації токсичних продуктів у зменшеному об'ємі унеможлиблюється перебування людини на цій території.

Встановлено, що система протипожежного захисту цехів деревообробних підприємств повинна бути повністю укомплектована і у своєму складі мати: 1) приймально-контрольний пристрій пожежної сигналізації; 2) комбіновані пожежні оповіщувачі; 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 із системою їх автоматичного відкриття. Впровадження такої системи протипожежного захисту дозволяє значно зменшити час вільного горіння завдяки вжиттю оперативних заходів для ліквідації пожежі.

Для розв'язання всіх питань, які пов'язані з впровадженням системи протипожежного захисту цехів деревообробних підприємств, було розроблено математичну модель пожежного ризику для об'єкта захисту, яка дозволяє визначати не тільки значення пожежного ризику, а й необхідну кількість всіх засобів протипожежного захисту. На підставі цієї математичної моделі розроблено алгоритм розв'язку і написано програму, яка рекомендована для впровадження службам ДСНС України під час проведення аудиту об'єктів захисту та для ефективного захисту деревообробних підприємств на випадок пожежі.

Встановлено, що середнє значення тривалості вільного розвитку пожежі на деревообробних підприємствах становить 25...36 хв і за цей час середньооб'ємна температура у приміщенні може досягти 965...980 °С, що може призвести до руйнування залізобетонних фермових конструкцій. Тому для оперативного початку локалізації та ліквідації пожежі необхідно знати межу вогнестійкості будівельних конструкцій цехів деревообробних підприємств, щоб ще до початку руйнування

конструкції пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС змогли ліквідувати дію високих руйнівних температур, тобто щоб початок ліквідації пожежі був менший від межі вогнестійкості.

З'ясовано, що 90% покрівель цехів деревообробних підприємств виготовлено з використанням аркових залізобетонних ферм довжиною 17 940 мм і 23 940 мм відповідно для прольотів 18 000 мм і 24 000 мм. Експериментально визначити межу вогнестійкості таких ферм практично неможливо. Тому було удосконалено методологію для встановлення класу вогнестійкості кроквяних ферм для скатних покрівель деревообробних підприємств за ознакою втрати несучої здатності, яка дозволяє за умови якісного виготовлення ферми встановити клас вогнестійкості без виконання вогневих експериментів. Встановлено, що вогнестійкість кроквяних ферм скатних покрівель залізобетонної конструкції деревообробних цехів з шириною прольоту 18 000 мм за ознакою втрати несучої здатності належить до класу вогнестійкості **R90**. Загальна відносна похибка теоретичних розрахунків відносно результатів експериментальних досліджень, як показали численні результати досліджень, не перевищує 5...8%.

Були проведені експериментальні дослідження з оперативного розгортання та тривалості локалізації і гасіння пожеж на деревообробних підприємствах пожежно-рятувальними підрозділами. Методика проведення експериментальних досліджень базувалася на використанні дробового факторного експерименту. Адекватність отриманих результатів перевіряли за критерієм Фішера. Встановлено, що тривалість оперативного розгортання передусім залежить від кількості відділень, які залучаються до виконання цієї роботи. Зі збільшенням, наприклад, їх кількості від одного відділення до шести тривалість оперативного розгортання зменшується в 1,3 разу. При збільшенні кількості пожежних автоцистерн і незмінній кількості відділень тривалість оперативного розгортання збільшується. Кількість пожежних ручних стволів також впливає на тривалість оперативного розгортання. Але при збільшенні кількості відділень цей час зменшується. Наприклад, збільшення кількості відділень на одне зменшує тривалість оперативного розгортання на 5%.

Також виконано експериментальні дослідження для оцінки ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів, які не горять і знаходяться перед фронтом пожежі. Було встановлено, що для забезпечення якісного охолодження поверхонь штабелів, які розміщені з боку фронту пожежі, необхідно подавати суцільний струмінь води під кутом не більше як 20° до поверхні штабеля у вигляді коливних маятникових рухів. У цьому разі інтенсивність подачі води доходить до 37 л/м·с. При цьому охолодження потрібно починати з верхньої частини штабеля і по всій довжині його сторони, а також враховувати той чинник, що кипіння стікаючої водної смуги починається на довжині її шляху в межах 0,5...0,8 м.

Під час розгляду економічної ефективності результатів виконаних досліджень встановлено, що обґрунтування оптимальних розмірів пожежних відсіків для цеху дозволяє зменшити площу пожежі до 30,9%, система протипожежного захисту об'єкта – до 27,7%, оптимізація тактики локалізації пожежі – до 19,9%, а оптимізація сил і засобів для ліквідації пожежі зменшує збитки від пожежі на 26,8%.

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, дав змогу зменшити збитки і витрати на одну пожежу у разі її виникнення на деревообробному підприємстві в середньому на 60 тис. грн.

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

Koval O. M. The development of scientific bases for fire suppression woodworking enterprises. – Qualifying scientific work on the manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 21.06.02 – Fire Safety. National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, 2017.

The dissertation is devoted to the further development of scientific foundations for the elimination of fires at woodworking enterprises. The main structural features of the premises of shops of woodworking enterprises and open warehouses of timber materials are considered. The simulation was carried out using the field method of forecasting the spread of fire in indoor enclosures of woodworking shops and its critical time associated with the possibility of evacuation of people.

Modeling and forecasting of fire spreading was carried out in the conditions of the finishing and assembling workshop of the woodworking enterprise (Sambir, Lviv oblast, V. Chornovola St., 36). The total area of the premises of the shop is 14 256 m²; height to farms – 6 m; the volume of premises for farms – 85 536 m³; length of the shop with a column of columns 6 m – 192 m; width of the shop – 72 m; fire load – 200 kg/m². Three fire situations were considered: a circular fire in the center of the shop; corner fire (180°) in the center of the shop; angular fire (180°) in the side of the shop. The results of investigations of the duration of the fire spread in the closed room of the woodworking shop showed that depending on the place of fire, the entire area of the shop may be covered by a fire within 15...33.4 min.

According to the results of these studies, the necessity of mandatory presence of fire compartments in the premises of the shop was established, which considerably reduces the rate of fire spreading. For this purpose, for the first time an optimization mathematical model and a package of applied programs were developed for determining the optimal number and area of fire compartments in enclosed premises of woodworking shops. The presence of fire compartments can reduce the speed of the fire spread in the closed shop room by 1.8 times.

Also, with the use of graph models, the forecast of the distribution of fire on open warehouses of timber woodworking enterprises is considered. It was established that the speed of the front of the fire in open warehouses of sawn timber under the same conditions is approximately 3...3,5 times greater than the speed of the front of the fire in open warehouses of round timber. The speed of the front of the fire is largely influenced by the speed and direction of the wind. The results of the analysis of graph models showed that with an increase in wind speeds up to 10 m/s compared with windless weather, the speed

of the front of the fire: 1) with a side wind $\alpha_v = 45^\circ$ increases by 21,4%; 2) with a passing wind $\alpha_v = 90^\circ$ increases by 26,6%; 3) in the counter wind $\alpha_v = 270^\circ$ decreases, approximately, 3.5 times. It has been established that the duration of the free propagation of a fire depends on the place of its occurrence in the warehouse quarter. The maximum duration of the free propagation of the fire occurs when it occurs on the outer corner of the quarter, and the smallest - in the middle of the quarter. The difference in this case is up to 2 times.

For the first time, mathematical models were developed for optimization of the choice of forces and means of fire fighting in the elimination of fires in enclosed premises of woodworking shops and in open warehouses of timber, taking into account the reliability of the fire extinguishing system. According to the optimization criterion, the damage was received from the fire from the fire and loss of fire and rescue units to eliminate the fire. This amount in the process of solving mathematical optimization problem should approach the minimum value. The results of research show that when considering the reliability of fire technology, its amount should be increased by 16,4%. The developed block diagrams of algorithms for solution of models and written programs have allowed to significantly improve the efficiency of fire elimination. Also, for the first time mathematical models of optimization of tactics of localization and extinguishing of fires in shops of woodworking enterprises and open warehouses of timber based on modeling and analysis of fire situations were developed. On the basis of them are written programs which can be used by the services of the State Oil Company of Ukraine for the development of fire prevention plans and for the operative determination of the priority tasks of the fire and rescue units for the elimination of the fire.

It has been shown that fires in open warehouses of timber influence environmental safety. It is established that the wind speed is an influential factor. Reducing the wind speed during a fire, for example, twice, reduces the volume of propagation of combustion products by about twice, and in some cases due to the increased concentration of toxic products in a reduced volume makes it impossible to stay a person on this territory.

It was established that the system of fire protection of shops of woodworking enterprises should be fully staffed and should include: 1) a control and fire alarm system;

2) Combined fire detectors; 3) sound fire alarms; 4) anti-smoke protection system (smoke and heat removal system with the mechanism of opening); 5) dense vertical curtains of non-combustible materials that fall from the ceiling to the floor, but not less than 2.5 m from the floor, forming under the overlapping tanks of smoke; 6) evacuation doors with their automatic opening system. The introduction of such a fire protection system can significantly reduce the time of free burning by taking operational actions to eliminate the fire.

To resolve all issues related to the implementation of the fire protection system of the shops of woodworking enterprises, a mathematical model of fire risk for a security object was developed that allows to determine not only the value of fire risk, but also the required number of all necessary fire protection means. On the basis of this mathematical model, an algorithm for the solution was developed and the program written for the implementation of the services of the NSC of Ukraine during the audit of objects of protection and for the effective protection of woodworking enterprises in the event of a fire was recommended.

It was found that the average duration of free fire development at woodworking enterprises is 25...36 minutes and during this time the average indoor temperature in the room can reach 965...980 °C, which can lead to the destruction of reinforced concrete structures. Therefore, for the operational start of localization and fire elimination, it is necessary to know the limit of fire resistance of building structures of workshops of woodworking enterprises, so that before the destruction of structures, fire and rescue subdivisions of NSC could eliminate the effect of high destructive temperatures, that is, the beginning of the fire elimination was lower than fire resistance.

It was established that 90% of the roofs of workshops of woodworking enterprises were made using arched reinforced concrete trusses of 17 940 mm long and 23 940 mm respectively for spans 18 000 mm and 24 000 mm. It is practically impossible to experimentally determine the limit of fire resistance of such farms. Therefore, the methodology for establishing the fire resistance class of roof racks for the pitched roofs of woodworking enterprises on the basis of loss of bearing capacity was improved, which allows, subject to the qualitative production of the farm, to establish a fire resistance class

without the implementation of fire experiments. It was established that the fire resistance of rafterbeds of pitched roofs of reinforced concrete structures of woodworking shops with a width of 18 000 mm on the basis of loss of bearing capacity belongs to the fire resistance class R90. The total relative error of theoretical calculations in relation to the results of experimental studies, as shown by the numerous results of research, does not exceed 5...8%.

Experimental studies were conducted on operational deployment and duration of localization and quenching of fires on woodworking enterprises by fire and rescue units. The method of conducting experimental research was based on the use of a fractional factor experiment. The adequacy of the results obtained was checked by Fischer's criterion. It has been established that the duration of operational deployment depends primarily on the number of departments involved in this work. With an increase, for example, their number from one compartment to six times the operational deployment is reduced by 1.3 times. With an increase in the number of fire truck tankers and unchanged number of depots, the duration of operational deployment increases. The number of fire hoses also affects the duration of operational deployment. But with increased number of offices this time decreases. For example, increasing the number of offices by one reduces the duration of operational deployment by 5%.

Experimental studies were also carried out to assess the effectiveness of water use to protect against the heating of stacks that do not burn and are in front of the front of the fire. It has been established that in order to ensure a qualitative cooling of the stacking surfaces located on the front of the fire, it is necessary to perform a continuous stream of water at an angle not exceeding 20° to the surface of the stack in the form of oscillating swing movements. In this case, the water supply intensity reaches 37 l/m·s. In this case, the cooling must begin with the upper part of the stack and along the length of its side, and also take into account the fact that the boiling of the flowing water stripe begins at the length of its path within 0.5...0.8 m.

When considering the economic efficiency of the results of the performed researches, it was established that the substantiation of the optimal size of fire compartments for the shop allows reducing the fire area to 30.9%, the system of fire

protection of the object – up to 27.7%, the optimization of the fire detection tactics – up to 19.9%, while the optimization of the fire and power resources reduces the damage from the fire by 26.8%.

The solution of the scientific and practical problem of eliminating fires at woodworking enterprises with minimization of losses from the fire and the costs of its elimination by optimizing organizational and technical measures, both for the object of protection, and for the fire and rescue units of the State Emergency Services of Ukraine, made it possible to reduce losses and the cost per fire in case of its occurrence on a wood-processing enterprise on average by 60 thousand grn ua.

Keywords: woodworking business, mathematical model, fire, fire situation, localization of fires, fire suppression, fire and rescue units, fire barrel.

Список публікацій здобувача

Статті у міжнародних фахових виданнях

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

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

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

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

Статті у наукових фахових виданнях

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Патенти

22. Коваль О. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60898 «Комп'ютерна програма для визначення оптимальних розмірів та кількості

пожежних відсіків» / О. М. Коваль – заявник та власник свідоцтва // Дата реєстрації 28.07.2015. – К. : ДСІВ України.

23. 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.

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

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

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

Матеріали науково-технічних конференцій

27. Гуліда Е. М. Надійність пожежної техніки для локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль // 12-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2015. – С. 144–146.

28. Коваль О. М. Обоснование применения пожарных отсеков в цехах деревообрабатывающих предприятий / О. М. Коваль // Надзвичайні ситуації: безпека та захист : IV Міжнар. наук.-практ. конф. – Черкаси: ІПБ, 2014. – С. 65–68.

29. Коваль О. М. Оптимізаційна математична модель визначення методів і засобів протипожежного захисту для об'єкта з урахуванням допустимого значення

пожежного ризику / О. М. Коваль // Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури : Міжнар. наук.-практ. конф. – К. : УкрНДІЦЗ, 2015. – С. 72–74.

30. Гуліда Е. М. Дослідження оптимальної тактики гасіння пожеж на складах лісоматеріалів деревообробних підприємств / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль // Забезпечення пожежної та техногенної безпеки : Всеукр. наук.-практ. конф. – Х. : НУЦЗ, 2015. – С. 3.

31. Коваль О. М. Определение скорости распространения фронта пожара на открытых складах круглых лесоматериалов штабельного хранения / О. М. Коваль // Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций : VI Междунар. науч.-практ. конф. – Кокшетау : КТИ МЧС РК, 2015. – С. 100–102.

32. Гуліда Е. М. Определение оптимальных размеров пожарных отсеков цехов для деревообрабатывающих предприятий / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль // Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций : VI Междун. науч.-практ. конф. – Кокшетау : КТИ МЧС РК, 2015. – С. 82–85.

33. Коваль О. М. Обґрунтування оптимальної тактики гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств / О. М. Коваль // Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки : Міжнар. наук.-практ. конф. – Х. : НУЦЗ, 2015. – С. 14.

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

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

36. Коваль О. М. Визначення необхідної кількості протипожежних засобів в приміщеннях цехів деревообробних підприємств / О. М. Коваль // Забезпечення пожежної та техногенної безпеки : Всеукр. наук.-практ. конф. – К. : УкрНДІЦЗ, 2016. – С. 64–66.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	32
1.1 Деревообробні підприємства та їх класифікація	32
1.2 Статистика пожеж.....	35
1.3 Аналіз небезпечних чинників пожежі на деревообробних підприємствах та їх вплив на екологію зовнішнього середовища.....	38
1.4 Сучасні методи і засоби протипожежного захисту та системи забезпечення пожежної безпеки на деревообробних підприємствах.....	42
1.5 Аналіз моделей пожеж на деревообробних підприємствах.....	46
1.5.1 Особливості горіння деревини	46
1.5.2 Пожежна небезпека деревини та її виробничих відходів	49
1.5.3 Моделі тепломасообміну при пожежі в приміщенні цеху.....	51
1.5.4 Моделі пожеж для відкритих складів лісоматеріалів	55
1.5.5 Обмеження розповсюдження пожежі на деревообробних підприємствах	60
1.5.6 Гасіння пожеж на деревообробних підприємствах	71
1.5.7 Вплив надійності пожежної техніки та спорядження на оперативно-тактичну діяльність пожежно-рятувальних служб та процес ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах	75
1.6 Сучасні методи визначення та підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій деревообробних підприємств.....	77
Висновки, мета та задачі дослідження.....	80
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖНИХ СИТУАЦІЙ З ОЦІНКОЮ	
ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ В ПРИМІЩЕННЯХ	
БУДІВЕЛЬ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	83
2.1 Основні конструктивні особливості приміщень цехів деревообробних підприємств.....	83

2.2 Моделювання прогнозування розповсюдження пожежі в закритих приміщеннях	85
2.3 Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі в приміщеннях цехів деревообробних підприємств.....	91
2.4 Вплив пожежних відсіків цехів деревообробних підприємств на швидкість розповсюдження пожежі та оптимізація їх розмірів	102
Висновки	110
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖНИХ СИТУАЦІЙ РОЗВИТКУ ТА ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ НА ВІДКРИТИХ СКЛАДАХ ЛІСОМАТЕРІАЛІВ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	112
3.1 Основні конструктивні особливості відкритих складів лісоматеріалів деревообробних підприємств та постановка завдання.....	112
3.2 Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі на складах пиломатеріалів.....	114
3.3 Моделювання пожежних ситуацій та швидкості поширення пожежі на складах круглих лісоматеріалів	124
3.4 Вплив небезпечних чинників пожежі на відкритих складах деревообробних підприємств на екологію навколишнього середовища	135
Висновки	148
РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ СИЛ І ЗАСОБІВ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖІ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ.....	150
4.1 Вихідні положення.....	150
4.2 Вибір та обґрунтування критерію оптимізації.....	151
4.3 Статистичне моделювання надійності пожежної техніки для локалізації та гасіння пожежі	159
4.4 Математичні моделі оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах з урахуванням надійності пожежної техніки ..	170
4.4.1 Модель та алгоритм оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі в приміщенні цеху	170

4.4.2 Модель та алгоритм оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі на відкритих складах лісо і пиломатеріалів.....	182
--	-----

4.5 Дослідження сил і засобів ліквідації пожежі у функціональній залежності від основних чинників пожежі та надійності системи пожежогасіння	191
--	-----

4.5.1 Дослідження при ліквідації пожежі в приміщенні цеху	191
---	-----

4.5.2 Дослідження при ліквідації пожежі на відкритих складах.....	195
---	-----

4.5.3 Аналіз отриманих результатів	199
--	-----

Висновки	203
----------------	-----

РОЗДІЛ 5 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ	206
---	------------

5.1 Вихідні положення.....	206
----------------------------	-----

5.2 Вогнестійкість залізобетонних конструкцій скатних крівель	208
---	-----

5.3 Порівняльний аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень вогнестійкості будівельних конструкцій та їх оцінка для деревообробних підприємств.....	224
--	-----

Висновки	228
----------------	-----

РОЗДІЛ 6 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТАКТИКИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ.....	229
---	------------

6.1 Локалізація пожежі на деревообробних підприємствах	229
--	-----

6.1.1 Локалізація пожежі в закритому приміщенні цеху	229
--	-----

6.1.2 Локалізація пожежі на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів	230
---	-----

6.2 Моделювання тактики локалізації та гасіння пожежі.....	231
--	-----

6.2.1 В закритому приміщенні цеху	231
---	-----

6.2.2 На відкритих складах лісо- і пиломатеріалів	248
---	-----

6.3 Оцінка ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів, які не горять і знаходяться перед фронтом пожежі	262
---	-----

6.4 Алгоритми розв'язку задач по визначенню оптимальних тактичних методів локалізації та гасіння пожежі.....	271
--	-----

6.4.1 Алгоритм тактики локалізації та гасіння пожежі в закритих цехах та чисельне дослідження тривалості ліквідації пожежі.....	271
6.4.2 Алгоритм тактики локалізації та гасіння пожежі на відкритих складах та чисельне дослідження тривалості ліквідації пожежі	278
6.5 Порівняльний аналіз та оцінювання оптимальних тактичних методів локалізації і гасіння пожежі з існуючими.....	282
Висновки	286
РОЗДІЛ 7 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТАКТИЧНИХ МЕТОДІВ ПО ЛОКАЛІЗАЦІЇ І ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ.....	287
7.1 Характеристика об'єкта дослідження	287
7.2 Методика експериментальних досліджень.....	289
7.2.1 Устаткування та вимірювальні прилади.....	289
7.2.2 Планування та методика математичної обробки результатів експериментів	290
7.2.3 Методика експериментальних досліджень по оперативному розгортанню та тривалості локалізації і гасінню пожеж на деревообробних підприємствах пожежно-рятувальними підрозділами	298
7.3 Результати експериментальних досліджень по оперативному розгортанню та тривалості локалізації і гасінню пожеж на деревообробних підприємствах пожежно-рятувальними підрозділами	301
7.3.1 Реалізація плану експерименту по оперативному розгортанню.....	301
7.3.2 Реалізація плану експерименту по тривалості локалізації і гасінню пожежі на відкритому складі пиломатеріалів	308
7.4 Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень.....	312
7.4.1 Аналіз результатів експериментальних досліджень по визначенню тривалості оперативного розгортання.....	312
7.4.2 Аналіз результатів експериментальних досліджень по визначенню тривалості локалізації і гасінню пожежі на відкритому складі пиломатеріалів.....	315
Висновки	319

РОЗДІЛ 8 ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ..... 321

8.1 Методи прогнозування виникнення пожежі на деревообробних підприємствах 321

8.2 Складові математичної моделі протипожежного захисту деревообробних підприємств..... 323

8.3 Математична модель визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту на деревообробних підприємствах..... 336

8.4 Програмна реалізація моделей та алгоритмів 338

8.5 Економічна ефективність впровадження методів і засобів протипожежного захисту та підвищення ефективності локалізації і гасіння пожеж на деревообробних підприємствах 349

Висновки 351

ВИСНОВКИ 352

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 357

ДОДАТКИ:

Додаток А1 – Лістинги програми для визначення оптимальної кількості і площі пожежних відсіків 386

Додаток А2 – Лістинги програми для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння при ліквідації пожежі в приміщенні цеху деревообробного підприємства 390

Додаток А3 – Лістинги програми для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння при ліквідації пожежі на відкритих складах лісоматеріалів..... 397

Додаток А4 – Лістинги програми для вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху 409

Додаток А5 – Лістинги програми для вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі на відкритих складах лісоматеріалів..... 416

Додаток А6 – Лістинги програми для визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту на деревообробних підприємствах.....	425
Додаток Б – Акт проведення експериментальних досліджень для дослідження тривалості оперативного розгортання.....	440
Додаток В – Акт передачі результатів наукового дослідження від ТЗОВ «КОМПАНІЯ «ВСЕСВІТ КОМФОРТУ».....	444
Додаток Д – Результати експериментальних досліджень для встановлення ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів.....	446
Додаток Е – Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження від ТЗОВ «Глобал Трейд Захід».....	451
Додаток І – Акт передачі результатів наукового дослідження від ТЗОВ «Будівельний регіон»	453
Додаток З – Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи від НУ цивільного захисту України	455
Додаток К – Акт передачі результатів наукового дослідження в ДСНС України в Івано-Франківській області	458
Додаток Л – Акт впровадження в навчальний процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності	460
Додаток М – Акт передачі результатів наукового дослідження в ГУ ДСНС України в Львівській області	462
Додаток Н – Акт проведення експериментальних досліджень для визначення часу локалізації і гасіння пожежі на складі пиломатеріалів.....	464

ВСТУП

Актуальність теми. Пришвидшення темпів науково-технічного прогресу як вирішального чинника підвищення ефективності виробництва є головною умовою інтенсифікації сучасної промисловості України. Деревообробна промисловість країни займає одне з провідних місць серед інших галузей. Головною 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. На протипожежний захист деревообробних підприємств здійснюють суттєві витрати з одночасним удосконаленням протипожежного законодавства.

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

Досвід розвинених країн світу засвідчує, що найбільшу відповідність системи забезпечення пожежної безпеки в умовах обмежених витрат на ці заходи пропонує, зважаючи на специфіку того чи іншого об'єкта, диференційований підхід. Це вимагає розроблення та практичної реалізації заходів, які враховують і пожежну безпеку об'єктів, і їх протипожежний захист з оцінюванням систем запобігання пожежам. Такий підхід має значні переваги над іншими. Наприклад, тільки від покращання профілактичної роботи на об'єктах, які підконтрольні органам ДСНС України, кількість пожеж на цих об'єктах зменшилася майже у 3,4 разу.

Ефективність заходів, які ґрунтуються на раціоналізації та оптимізації роботи пожежно-рятувальних підрозділів, на оцінюванні результатів пожежно-технічного обстеження та іншої профілактичної роботи із впровадження системного підходу до аналізу таких завдань, дасть змогу розробляти інформаційні технології щодо тактики пожежогасіння, інформаційні моделі для комп'ютерного моделювання, а також структурувати й уніфікувати чинні нормативні документи.

Чимало закордонних фірм і наукових центрів спеціалізуються на розробленні інформаційних технологій зі створенням пакетів прикладних програм для пожежної

охорони. Наприклад, центр пожежних досліджень Національного бюро стандартів США розробив математичні моделі розвитку пожежі в будівлях і приміщеннях, а в Московській академії Державної протипожежної служби (Росія) розробили методи розрахунку тепломасообміну під час пожежі та пакети прикладних програм для їх використання в практичній діяльності пожежно-рятувальних підрозділів.

Проектування деревообробних підприємств, їх протипожежний захист, дії пожежно-рятувальних підрозділів із захисту деревообробних підприємств та ліквідації пожежі регламентуються низкою нормативних документів. Однак попри заходи, які вживаються, кількість пожеж на деревообробних підприємствах практично незмінна впродовж останніх 10 років (90...100 пожеж за рік [100, 101]). Це вказує на те, що, можливо, бракує сил і засобів або їх неефективно використовують, недостатньо враховують різні фактори, які впливають на виникнення і розвиток пожежі.

Для розв'язання цієї проблеми потрібно розробити комплекс різних математичних моделей, які адекватно описуватимуть процеси, що впливають на виникнення пожежі, її поширення, визначення достатньої кількості сил і засобів для локалізації і ліквідації пожежі і в закритих приміщеннях цехів, і на відкритих складах лісоматеріалів, а також напрацювати рекомендації пожежно-рятувальним підрозділам.

Процеси пожеж на деревообробних підприємствах досліджували Р. Р. Notario, F. G. Moreno, C. S. Tarifa, М. С. Артем'єв, С. В. Горшков, Ю. І. Грицюк, П. П. Девлишев, М. О. Іванов, М. П. Копилов, О. М. Курбатський; форму факела і теплове випромінювання від нього вивчали в роботах D. Drysdale, А. Д. Кузик, Л. М. Куценко, О. П. Созник; питання тепломасообміну досліджували Х. І. Ісхаков, Е. М. Логачев, С. В. Пузач, Р. Ш. Хабібুলін; питання гасіння розглядали у працях І. М. Абдурагімов, Ю. О. Абрамов, А. С. Беліков, Е. М. Гуліда, О. М. Дигало, М. В. Литвин; питання оптимізації ліквідації пожежі – О. Є. Басманов, Д. М. Войтович, В. М. Груманс, Е. М. Гуліда, І. О. Доррер, С. Ф. Кривошликов, І. О. Мовчан, О. О. Смор, О. А. Тарасенко, С. В. Ушанов та ін.

При цьому зовсім не розглядалося моделювання пожежних ситуацій в

закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств з метою встановлення швидкості поширення пожежі, визначення часу тривалості вільного розвитку пожежі до початку її гасіння та критичного часу пожежі, за який можна евакуювати працівників цеху. Аналіз праць з визначення швидкості поширення фронту пожежі на відкритих складах лісоматеріалів штабельного зберігання засвідчує, що на сьогодні немає вдосконаленої методології її визначення. Крім цього, не розглядалися питання оптимізації тактичних дій в процесі ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах.

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

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

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

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

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі **задачі**:

1) розробити математичну модель для оцінки пожежних ситуацій процесу розвитку та поширення пожежі в приміщеннях деревообробних підприємств;

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

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

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

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

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

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

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

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

Методи дослідження. У роботі використано аналітичні, статистичні та числові методи дослідження. Під час розгляду пожежних ситуацій у закритому приміщенні цеху та на відкритих складах лісоматеріалів застосовували теорію тепломасообміну. Числові методи використовували для розв’язку диференціальних рівнянь та обчислення інтегралів. Теорію планування експерименту і методи математичної статистики застосовували для раціонального планування експерименту, оброблення його результатів і визначення оптимальних значень чинників. Для розв’язування оптимізаційних задач з визначення сил і засобів для ліквідації пожежі, методів локалізації і гасіння пожежі, оптимізації протипожежних відсіків та методів і засобів протипожежного захисту об’єктів захисту використовували імовірнісний метод Монте-Карло з розробленням пакетів прикладних програм. Під час розгляду пожежних ризиків для деревообробних підприємств, а також надійності пожежної техніки для ліквідації пожежі використовували основні методи і положення теорії надійності.

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

вперше розроблено:

- оптимізаційну математичну модель для визначення площі і кількості пожежних відсіків в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств;
- метод визначення швидкості розвитку та поширення фронту пожежі на відкритих складах лісоматеріалів з використанням графової моделі;
- математичні моделі для оптимізації тактики та тривалості локалізації та гасіння пожежі в залежності від ситуації їх розвитку в закритих приміщеннях цехів і на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств за критерієм мінімуму збитків;

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

удосконалено:

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

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

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

отримали подальший розвиток:

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

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

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

Практичне значення отриманих результатів. Розроблений комплекс математичних моделей, методів та алгоритмів їх розв'язку є підставою для обґрунтування організаційно-технічних заходів, які спрямовані на запобігання

поширення пожежі на деревообробних підприємствах у разі її виникнення і на підвищення ефективності її ліквідації. Виконані теоретичні й експериментальні дослідження та отримані результати дають змогу значно підвищити пожежну безпеку деревообробних підприємств і можуть бути використані безпосередньо під час ліквідації пожежі.

Використання отриманих у роботі математичних моделей та методів з програмно реалізованими алгоритмами дозволяє визначати оптимальні значення чинників щодо запобігання поширення пожежі на деревообробних підприємствах і підвищити ефективність її ліквідації. Впровадження протипожежних засобів в опоряджувально-складальному цеху деревообробного підприємства (м. Самбір Львівської області, вул. В. Чорновола, 36) з використанням програмного комплексу з оптимізації вибору кількості протипожежних засобів для приміщень цехів деревообробних підприємств з урахуванням пожежного ризику дозволило зменшити пожежний ризик для цеху в 11,3 разу і довести його значення до середнього $2,4 \cdot 10^{-5}$.

Математична модель оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж на лісоскладах деревообробних підприємств і програмне забезпечення було використано при розробленні сценарію проведення комплексних навчань пожежно-рятувальними підрозділами ГУ у Львівській області ДСНС України в м. Самбір на лісоскладі деревообробного підприємства. Використання розробленої математичної моделі дало змогу зменшити тривалість ліквідації пожежі на 32% у порівнянні з нормативним і відповідно зменшити збитки від пожежі на 21%.

Отримані результати можуть бути впроваджені в підрозділах Державної служби надзвичайних ситуацій (ДСНС) України, а також у науково-дослідних і проектних організаціях у процесі розроблення нормативної документації, проектуванні та будівництві нових видів споруд деревообробної промисловості.

Результати роботи передані для апробації та подальшого впровадження: до науково-дослідних і проектних організацій, деревообробних підприємств та головних управлінь ДСНС України, а також частково впроваджені в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України та Львівського

державного університету безпеки життєдіяльності при формуванні та наповненні таких дисциплін, як «Пожежна тактика», «Методологія та організація наукових досліджень» та «Основи теорії надійності та техногенний ризик».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом самостійної роботи автора. Особистий внесок здобувача в працях, які написані у співавторстві, полягає в такому. У роботі [38] визначено значення екологічного ризику та імовірність евакуації людей із зони пожежі. В роботі [44] сформульовано в загальному вигляді задачу оптимізації пожежних відсіків, визначено функцію мети, критерій та відповідні обмеження, розроблено блок-схему алгоритму визначення оптимальних розмірів і кількості пожежних відсіків. В роботі [45] поставлено задачі дослідження, обґрунтовано вибір критерію вогнестійкості, розроблено математичні моделі визначення міцності конструкцій скатних покрівель одноповерхових будівель цехів. У роботі [46] сформульовано мету дослідження, вибрано та удосконалено математичну модель, яка дозволяє прогнозувати поширення пожежі для різних об'єктів, розглянуто три пожежні ситуації, на підставі результатів їх аналізу зроблено висновки. В роботі [47] сформульовано мету дослідження, поставлено задачі дослідження, визначено значення основних показників надійності конструктивних елементів кожного блоку пожежної техніки з використанням методу статистичного моделювання та розроблено математичні моделі для врахування надійності пожежної техніки при визначенні її кількості. В роботі [272] розроблено математичну модель оптимізації часу тривалості ліквідації пожеж у приміщеннях цехів деревообробних підприємств. У роботі [48] розроблено математичну модель для вибору оптимального тактичного плану локалізації та гасіння пожеж в закритих цехах деревообробних підприємств. У праці [56] з використанням методу статистичного моделювання визначено основні параметри для встановлення надійності пожежної техніки. В роботі [57] розроблено оптимізаційну модель тактики гасіння пожеж на складах лісоматеріалів деревообробних підприємств. У праці [58] сформульовано в загальному вигляді задачу оптимізації пожежних відсіків. В роботі [111] розроблено математичну модель і блок-схему алгоритму для вибору оптимального варіанта тактики

локалізації і гасіння пожеж на складах лісоматеріалів. В роботі [112] одержано математичну модель визначення методів і засобів протипожежного захисту для об'єкта з урахуванням допустимого значення пожежного ризику.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на IV Міжнародній науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (Черкаси, 2014); 16-й Всеукраїнській конференції рятувальників (Київ, 2014); 12-му Міжнародному симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2015); семінарі УкрНДІЦЗ «Перспективи запровадження в Україні системи управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» (Київ, 2015); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури» (Київ, 2015); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки» (Харків, 2015); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (Кокшетау, 2015); Міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки» (Харків, 2015); II Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства, європейський досвід і перспективи» (Львів, 2015); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки» (Київ, 2016).

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

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

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 випускає відповідну продукцію.

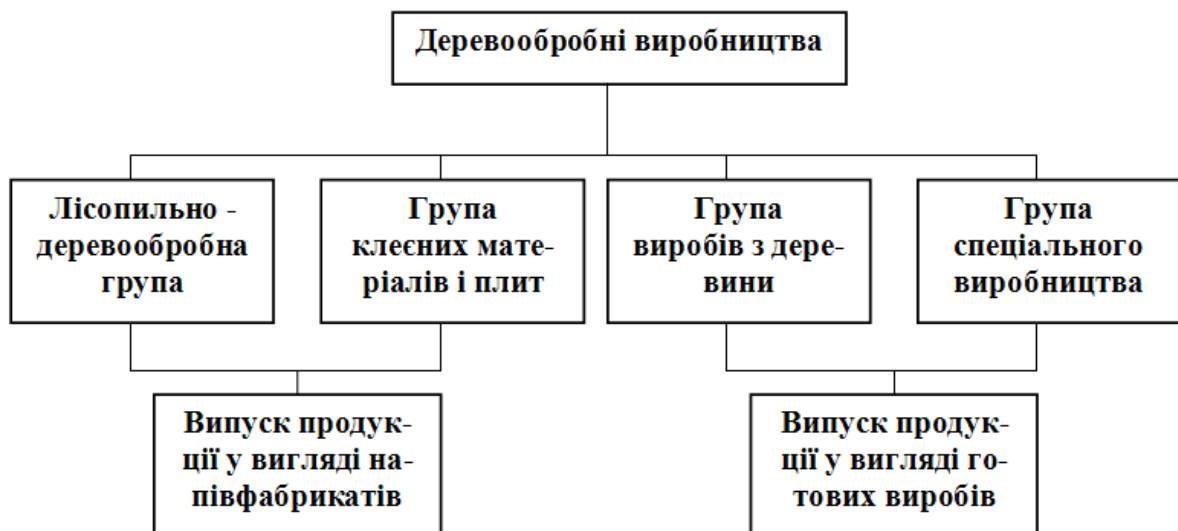


Рис. 1.1. Групи виробництв деревообробної галузі

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 72×144 м) до $10\,368\text{ м}^2$, 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 м^2 [234]. 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, у 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.

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

У закритих деревообробних цехах розміщують заготовки і деталі. Сировиною для заготовок і деталей слугують пиломатеріали хвойних 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 з деревини.

Під час механічної обробки заготовок у цехах завжди утворюються й осідають на робочих місцях технологічні відходи (тріски й тирса).

Окрім закритих цехів, у яких обробляють деревину, особливо пожежонебезпечними спорудами є відкриті склади пиломатеріалів і склади круглих лісоматеріалів штабельного зберігання. Площа групи штабелів пиломатеріалів відкритого зберігання, як правило, має бути не більше ніж 1200 м² [220].

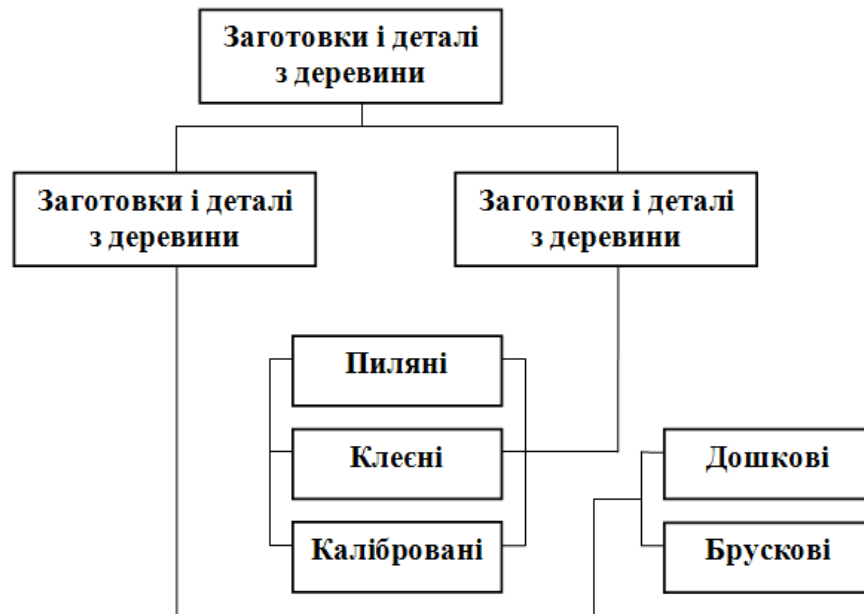


Рис. 1.3. Класифікація заготовок і деталей

Групи штабелів потрібно відокремлювати між собою поздовжніми і поперечними розривами. Ширина поздовжніх розривів повинна бути не менша від полуторної висоти, поперечних – не менша ніж одна висота штабелів. Висота штабелів пиломатеріалів згідно з рекомендаціями [220] коливається в межах 7...12 м. На поздовжніх розривах слід передбачати тверде покриття шириною не менше як 3 м для проїзду пожежних машин. Групи штабелів утворюють так званий квартал. Площу кварталу груп штабелів слід приймати не більше як 4,5 га, а ширину – не більше ніж 100 м.

Площу кварталу груп штабелів круглих лісоматеріалів варто приймати також не більше як 4,5 га. Ширина кожної групи штабелів у кварталі має бути не більша за 50 м, а кварталу – не більша ніж 100 м. Розриви між кварталами залежать від висоти штабелів і коливаються в межах 30...50 м.

1.2 Статистика пожеж

Зважаючи на високе пожежне навантаження, деревообробні підприємства є пожежонебезпечними об'єктами. Їх кількість в Україні

досягла 441 [97]. І останніми роками цей показник безперервно зростає, що ставить більш жорсткі вимоги до забезпечення їх протипожежного захисту.

Результати моніторингу УкрНДІЦЗ стану з пожежами в Україні [102] вказують 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-м зросла на 17,3%, зокрема на спорудах виробничого призначення – на 18,3%, а на складських спорудах – на 17,6%. Проаналізовано статистику пожеж на деревообробних підприємствах від 2011 року, їх динаміку та причини виникнення. Дуже часто на цих підприємствах виникають пожежі, які призводять до значних збитків [61]. Наприклад, тільки за 2011 рік в Україні на деревообробних підприємствах виникло 93 пожежі, що призвело до 3962 тис. грн прямих збитків, які становлять 0,5% від загальних прямих збитків усіх пожеж нашої країни за 2011 рік (у 2011-му було зареєстровано 60 790 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).



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

Осередком пожежі стала сушильна камера, з якої вогонь поширився всією покрівлею. Внаслідок пожежі знищена покрівля цеху площею близько 4800 м², сушильні камери, операторська та близько 100 м³ дощок.

На території ТОВ «Свіспан-Лімітед» в м. Костопіль 20 липня 2012 року виникла пожежа (рис. 1.5), яка також призвела до значних збитків [182].



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

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].

Основні причини виникнення пожеж: несправність виробничого обладнання – 0,2%; порушення правил пожежної безпеки встановлення 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 [100–102, 168] показав, що 64% всіх пожеж трапляються на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів (рис. 1.6). Такий показник пов'язаний з тим, що ці склади більше поширені, ніж деревообробні цехи. Ще однією причиною виникнення пожеж на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів можуть бути атмосферні грозові розряди.

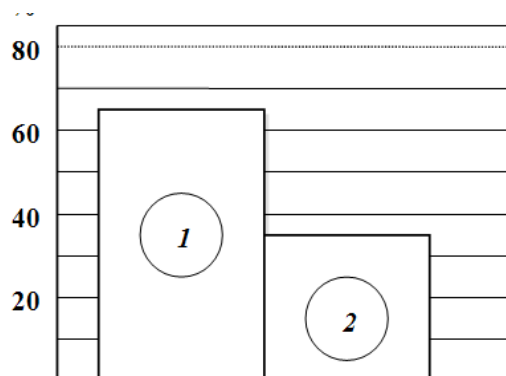


Рис. 1.6. Розподіл пожеж на деревообробних підприємствах:

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

На протипожежний захист деревообробних підприємств витрачають чималі кошти. Крім цього, одночасно удосконалюють протипожежне законодавство. Але попри всі протипожежні заходи 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 має затяжний характер, що вказує або на недостатність сил і засобів на ліквідацію пожежі, або на неефективне їх використання, або на недостатнє врахування чинників, які впливають на розвиток пожежі.

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

Екологічна безпека – це стан захищеності довкілля і життєво важливих інтересів людини та громадянина від можливої негативної дії господарської й іншої діяльності і загроз виникнення надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру та їхніх наслідків. До поняття екологічної безпеки входить система регулювання й управління, що дає змогу прогнозувати, не допускати, а в разі виникнення – ліквідовувати розвиток надзвичайних ситуацій. Екологічна безпека реалізується на глобальному, регіональному і локальному рівнях. Локальний рівень охоплює міста, райони, підприємства металургії, хімічної, нафтопереробної, гірничодобувної промисловості тощо. Для

локального рівня розроблено дуже багато заходів і технологій, які дозволяють на певному рівні забезпечувати екологічну безпеку. У цьому напрямі виконано багато робіт, результати яких на сучасному етапі деякою мірою дають змогу підвищувати ефективність захисту від забруднення навколишнього середовища. Це праці таких відомих вчених, як: 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. Проблему екологічних ризиків досліджували 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 ін. Але розроблені ними методи стосуються лише теоретичних підходів до цієї проблеми, а також питання очищення води від токсичних речовин, боротьби зі знищенням регіональних і локальних зелених насаджень тощо [171, 172]. Дуже мало праць присвячено забрудненню навколишнього середовища токсичними викидами від пожеж. Особливо це стосується пожеж на складах лісоматеріалів, де в цій локальній зоні температура середовища перевищує 70 °С, густина кисню може стати меншою за 0,226 кг/м³, також у цій зоні може збільшитися понад норму густина оксиду вуглецю CO > 0,00116 кг/м³, вуглекислого газу CO₂ > 0,11 кг/м³, хлористого водню HCl > 23·10⁻⁶ кг/м³ та інших токсичних речовин, які можуть загрожувати життю людини. Крім цього, під час пожежі утворюється дим, оптична густина якого може бути більша від 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 гранично допустимого екологічного ризику і, відповідно, до забруднення навколишнього середовища.

Однією з перших наукових праць щодо розвитку та поширення пожеж на відкритих складах пиломатеріалів за результатами експериментальних досліджень була оприлюднена робота С. S. Tarifa, Р. Р. Notario, F. G. Moreno на 10-му Симпозіумі з процесів горіння на пожежах в 1965 році в м. Піттсбург (США) [307]. Механізм поширення пожежі було представлено у вигляді

розповсюдження іскор і головешок, що горять і розлітаються під дією конвективної колонки, яка утворюється над осередком пожежі. Цей механізм поширення пожежі на відкритих складах розвинув у кандидатській дисертації М. С. Артем'єв (захистився 1981 року в м. Москві (ВІПТШ)) [12]. Але в цих дослідженнях не розглянуто питань екологічної безпеки і не пов'язано пожежний ризик з екологічним.

У праці [49] для розв'язання проблеми, пов'язаної із забрудненням середовища внаслідок пожеж, було обрано інтегральну модель пожежі, яка дозволяє адекватно оцінити показники масообміну з навколишнім середовищем при пожежі. Метою роботи було визначити забруднення навколишнього середовища від пожеж та його вплив на екологічну безпеку. Автори встановили, 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. Також встановлено, що при пожежі тільки в одному житловому приміщенні утворюється в середньому хмара об'ємом 507,6 м³, у якій концентрація соляної кислоти (HCl) перевищує гранично допустиму концентрацію.

У більшості наукових праць серед небезпечних чинників пожежі розглядають ризик (зокрема й екологічний) з позиції впливу на безпеку здоров'я людини [80, 175, 286, 309, 312]. Щодо ризику стосовно екологічних систем відзначимо таке. Автори роботи [175] розглядають ступені ризику завдання збитку екологічній системі, враховуючи 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. У праці [10] стверджується, що екологічний ризик – це ймовірність загибелі біологічної системи (організму, популяції, населення). Розвиваючи цю ж тематику, автор роботи [79] тільки уточнює поняття екологічного ризику, але не

наводить ніяких пропозицій, як запобігати впливу чинників техногенного та природного характеру на екологію зовнішнього середовища.

В. І. Андрейцев запропонував концепцію Закону України «Про екологічну (природно-техногенну) безпеку» [7], наукову модель якого він розробив у травні 1995 року. Ця концепція одержала широке визнання та схвалення і міжнародних експертів, 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.

У праці [249] автор визначає екологічний ризик як імовірність настання негативних наслідків для довкілля та/або людини в результаті діяльності суб'єктів екологічних правовідносин або впливу на об'єкти підвищеної екологічної небезпеки природних факторів.

Докладно питання ризиків техногенного та природного характеру в Україні розглянуто в роботі [6]. При цьому наведено 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).

У роботах [169, 170, 235] розглянуто 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 глибоко ці питання ще ніхто не вивчав. Виникає проблема у невизначеності зв'язку між пожежним та екологічним ризиками, розв'язок якої дасть змогу з певною ймовірністю прогнозувати екологічну безпеку на локальному рівні та запобігати загрозі, яка може виникнути при її аудиті, наприклад, на відкритих складах лісоматеріалів.

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

У межах однієї роботи розглянути сучасні методи і засоби протипожежного захисту та системи забезпечення пожежної безпеки для всіх груп виробництв деревообробної галузі дуже складно. Тому увагу зосередимо на найбільш небезпечних з погляду пожежної безпеки деревообробних підприємствах, які випускають продукцію у вигляді готових виробів. До таких деревообробних підприємств належать 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 з розмірами УТС [130]. Зазвичай при таких цехах розміщують склади пило- і лісоматеріалів, на яких зберігають заготівельний матеріал для виготовлення виробів. Склади для пиломатеріалів можуть бути і закритими, і відкритими, а для лісоматеріалів – тільки відкритими.

Розглянемо сучасні методи і засоби протипожежного захисту та системи забезпечення пожежної безпеки для закритих приміщень цехів деревообробних підприємств і для відкритих складів пило- і лісоматеріалів.

Згідно з 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 евакуацією людей; 5) системи протидимного захисту; 6) системи централізованого пожежного спостереження; 7) системи диспетчеризації 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 оповіщувачів (димув, полум'я, тепла і комбінованих) та мовну систему оповіщення. При встановленні системи пожежної сигналізації враховують такі інформаційні положення [237, 265, 270]: 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).

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



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

Системою протипожежного захисту є також 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.

У 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 з водогінної мережі. Спринклерні головки закриті легкоплавкими замками, що розраховані на спрацювання при температурі 72, 93, 141 та 182 °С. Площа змочування одним спринклером становить від 9 до 12 м², а інтенсивність подачі води – 0,1 л/с·м². 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 в разі зривання головки спочатку виходить повітря, а потім вода. Змішані системи влітку заповнюють водою, а взимку – повітрям.

Дренчерні установки обладнують розбризкувальними головками, які постійно відкриті. Вода подається в дренчерну систему вручну або автоматично при спрацюванні пожежних оповіщувачів, 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 через їх високу вартість. Замість цих систем усі цехи обладнані

залежно від виду пожежного навантаження ручними вуглекислотними і пінними вогнегасниками, а також частково пересувними вуглекислотними.

Ручні вуглекислотні вогнегасники призначені для гасіння невеликих пожеж, усіх видів загорання. Вони приводяться в дію вручну. Через вентиль стиснена рідка вуглекислота прямує у патрубок, де розширюється і за рахунок цього її температура знижується до -70°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, щоб не обморозити руки; зберігати подалі від тепла, аби запобігти саморозрядженню. 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, які горять без доступу повітря.

Ручні хімічні пінні вогнегасники використовують 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. Не можна нею гасити також калій, натрій, магній та його сплави, оскільки внаслідок їх взаємодії з водою, що є в піні, виділяється водень, котрий посилює горіння. У промислових приміщеннях засоби пожежогасіння розташовують згідно з «Правилами пожежної безпеки в Україні». У коридорах, проходах, проїздах або інших місцях, окрім вогнегасників, розміщують пожежні щити з набором засобів пожежогасіння.

До систем оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей, керування якими здійснюється з приміщення пожежного поста, належать: світлова і звукова сигналізації з розшифруванням зон оповіщення; модулі запуску і зупинки з вибором 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 диспетчеризації 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 є помилковим. Це пояснюється тим, що вже на 10 хв пожежі в осередку пожежі оптична густина диму буде більше за 1,2 Нп/м, а видимість менша ніж 1,5 м [51, 255].

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 будь-якого виробу. За своєю структурою це пористий матеріал з великою кількістю комірок, заповнених повітрям. Об'єм порожнин у деревині перевищує об'єм твердої речовини. Співвідношення твердої речовини і порожнин для деяких порід деревини наведено в табл. 1.1 [75].

Таблиця 1.1

Об'єм твердої речовини і порожнин деревини

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

Деревина складається із суміші багатьох речовин різноманітної будови, яка має різні властивості. Основними компонентами деревини є геміцелюлози,

целюлоза та лігнін [49]. Геміцелюлози – це суміш низькомолекулярних сахаридів: пентозанів ($C_5H_8O_5$), гексозанів ($C_6H_{10}O_6$) та їхніх похідних у вигляді п'яти- та шестивуглецевих карбонових кислот, лактонів тощо. Целюлоза являє собою високомолекулярний полісахарид $(C_6H_{10}O_5)_n$. Лігнін у своєму складі має здебільшого ароматичні молекули.

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

Горіння деревини істотно відрізняється від горіння рідин і газів та може протікати відразу в кількох режимах – гомогенному і гетерогенному [66, 228]. Тому при горінні деревини можна виділити дві фази: 1) гомогенне (тобто полум'яне) горіння газоподібних продуктів розкладання; 2) гетерогенне горіння твердого вуглецевого 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 виділятися вода, яка хімічно пов'язана, а також починається 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 (головно 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 відбувається інтенсивний піроліз головної складової деревини – целюлози і піроліз найстійкішої компоненти – лігнінів. При подальшому нагріванні до температури 500...550 °C швидкість виділення газоподібних речовин зменшується в основному завдяки вже виділеним усім летучим. За температури близько 600 °C розклад деревини на газоподібні продукти та вуглецевий залишок завершується.

Аби деревина спалахнула, необхідно прогріти її поверхню до температури 290...300 °С, за якої вистачало б тепла на прогрів і піроліз. Стадія полум'яного горіння займає менше 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 і газів, що утворюються при її розкладанні; горіння вугілля, що утворилося. Між цими періодами є перехідний етап, що характеризується перебігом обох процесів.

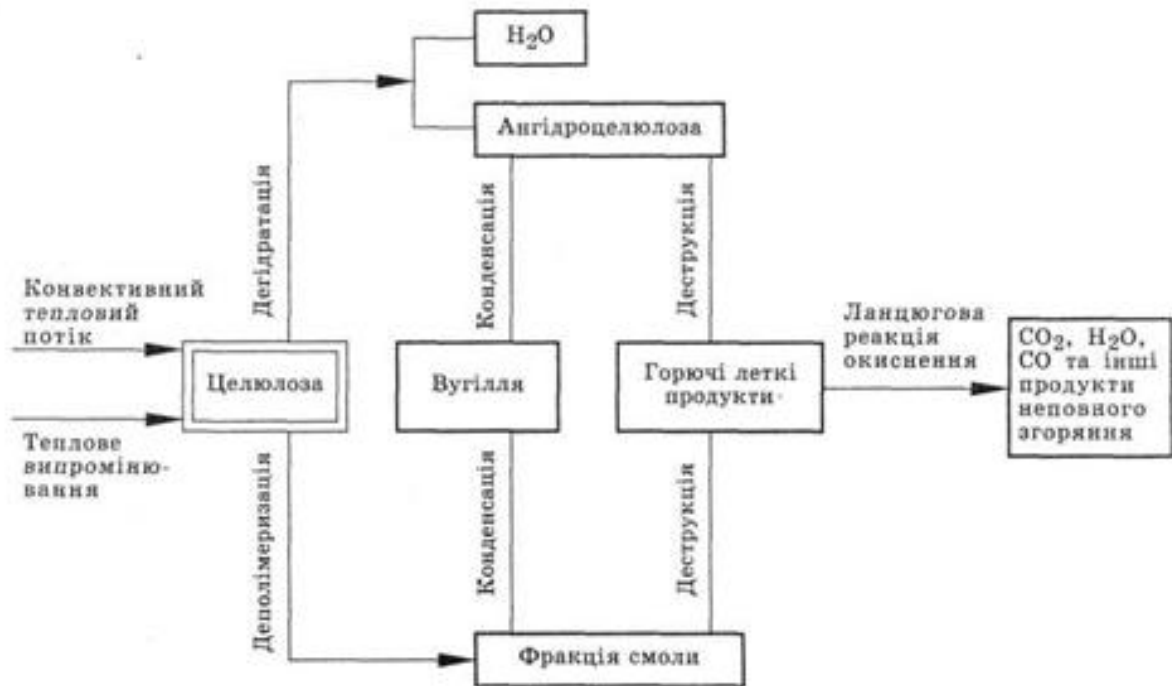


Рис. 1.8. Процес термічних перетворень целюлоз [66]

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

У деревообробних цехах виділяють дві пожежонебезпечні зони: 1) пожежонебезпечна зона класу П-I – простір у приміщенні, у якому знаходиться горюча рідина, температура спалаху якої більша за $+61\text{ }^{\circ}\text{C}$ (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^3 (всі відділення цеху, в яких здійснюється механічна обробка деревини).

Пожежонебезпечні зони класу П-II займають в цехах 92...96% загальної виробничої площі. У процесі механічної обробки деревини виділяється пил, який є пожежонебезпечним у стані аерогелю з нижньою концентраційною межею більшою за 65 г/м^3 і температурою спалаху вище $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Залежно від середнього розміру часток пил може довгостроково знаходитися в зваженому стані або відразу ж осідати після короткочасного переходу у зважений стан. Дисперсна система, що представляє собою пил, зважений у повітрі, називається аерозолем. Осілий пил називається аерогелем. Крім цього, на цих зонах знаходяться відходи механічної обробки (стружка, тирса тощо) та заготовки і вироби з деревини (тверді горючі матеріали).

Аерозолі за своїми властивостями займають проміжне положення між аерогелем і гомогенною газоповітряною сумішшю. Як і аерогелі, вони є гетерогенними дисперсними системами з однаковою твердою фазою, і

поводження 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, найважливішими є: дисперсність, хімічна активність, адсорбційна здатність, схильність до електризації [99, 251, 252].

Загалом горіння аерогелю в осілому стані нагадує горіння твердого горючого матеріалу, з якого цей пил отриманий. Особливою рисою аерогелю є його здатність переходити у зважений стан. При нагріванні відбуваються усі підготовчі процеси, характерні для твердих горючих матеріалів, однак швидкість їх протікання більша, що пояснюється розвиненою поверхнею, підвищеною хімічною активністю, зниженою теплопровідністю матеріалу в результаті здрібнювання, збільшеною адсорбційною здатністю пилу. Це зумовлює менший період індукції запалення, велику швидкість поширення горіння, а також підвищену схильність до самозаймання в порівнянні з вихідним матеріалом, з якого отриманий пил.

Окисні процеси відбуваються одночасно і на поверхні пилового шару, і в його глибині. При цьому в реакції бере участь кисень, адсорбований на поверхні матеріалу. Швидкість протікання процесів окислювання під шаром горючого пилу нижча, ніж на поверхні, як наслідок 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 самозапалитися через різкий приплив кисню і спричинити вибух завихреного пилу [99].

Аерозолі запалюються і горять аналогічно газоповітряним сумішам. Тому їхня пожежна небезпека характеризується такими ж параметрами, як і газоповітряних сумішей. Схильність аерозолів до коагуляції (злипання) й осадження істотно відрізняє їх від газоповітряних сумішей. Якщо поширення

полум'я в газових сумішах зумовлено прогрівом холодної суміші за рахунок теплопровідності, то поширення полум'я в пилоповітряних сумішах відбувається завдяки прогріву холодної суміші випромінюванням, що випускається фронтом полум'я.

На підставі розглянутих пожежонебезпечних чинників приміщення цехів деревообробних підприємств відносять до категорії В з характеристикою їх як пожежонебезпечні через наявність у них горючого пилу, що утворює пилоповітряні суміші, а також відходів механічної обробки та твердих горючих матеріалів [174].

1.5.3 Моделі тепломасообміну при пожежі в приміщенні цеху

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

- на половині висоти приміщення різниця тиску в різних його зонах не перевищує десятої частини відсотка від значення атмосферного тиску;
- швидкості часток диму та газів дуже невеликі відносно швидкості звуку, що відповідає їх невеликим силам інерції;
- тепловиділення хімічних реакцій горіння визначає температурний режим приміщення;
- у приміщенні потрібно враховувати процеси турбулентної дифузії внаслідок великих швидкостей дифузії.

Для розрахунку тепломасообміну при пожежі в приміщенні використовують головно три групи методів [14, 88, 94, 219, 279, 281, 282, 294, 297, 313]: 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 огорожувальних 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 огорожувальних конструкцій;
- емпіричні залежності для розрахунку сумарних теплових потоків в огорожувальні конструкції наведені тільки для двох матеріалів цих конструкцій (бетону або цегли) [14, 135];
- емпіричні залежності для розрахунку сумарних теплових потоків в огорожувальні конструкції наведені тільки для випадку горіння твердих горючих матеріалів [14, 135];
- масову швидкість газифікації пожежного навантаження представлено у вигляді емпіричного співвідношення [14, 135].

Не зважаючи на вказані недоліки, інтегральні моделі мають перевагу в 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.

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

Зонні моделі [14, 83, 268, 279, 304] дозволяють зменшити або зовсім усунути вплив на точність розрахунку деяких недоліків інтегральних моделей. Це досягається завдяки розбиттю приміщення на окремі зони, в яких різниця між параметрами газового середовища була б мінімальною. У кожній із цих зон

для отримання необхідних параметрів використовують інтегральні моделі. У цьому випадку використовують більшу кількість звичайних диференціальних рівнянь, які утворюють замкнену систему. Розв'язок таких рівнянь в більшості випадків виконують числовими методами, наприклад, методом типу Рунге-Кутта.

Приклади розв'язку задач з використанням зонних моделей розглянуто для спрощених випадків, зовсім їх не використовували для прогнозування параметрів пожежі в деревообробних цехах [14].

Диференціальні (польові) моделі дозволяють докладно описувати процеси тепломасообміну при пожежі в приміщенні. Детерміністичні математичні моделі пожеж розробляють 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 простіших моделей. Ця робота розпочалася у 80-х роках минулого століття [256, 299]. У США в м. Нотр-Дам в університеті розробили дво- і тривимірну модель під назвою UNDSAFE для прогнозування динаміки пожеж у приміщеннях [301].

Аналогічні роботи з розробки подібних програм були виконані у Великобританії. Так, фірма CHAM LTD разом із дослідною пожежною станцією розробили дво- і тривимірні моді пожеж JASMINE та відповідне програмне забезпечення для прогнозування розвитку пожеж. Крім цього, у Великобританії розробили програмний комплекс SOFIE для моделювання пожеж у приміщеннях [283].

Тривимірні диференціальні моделі використовують у Японії для прогнозування поширення небезпечних факторів пожежі в атріумах будинків [293] та двовірні – для моделювання, наприклад, поширення пожежі в шестиповерховому блоці приміщення [257–261, 302]. У Росії розробили і використовують дво- і тривимірні диференціальні моделі тепломасообміну при пожежі [14, 199, 209, 218, 298, 300], за допомогою яких прогнозують динаміку пожеж та її небезпечних чинників.

Найдокладніше методологію розроблення основних рівнянь диференціальної (польової) моделі тепломасообміну при пожежі розглянуто в роботі [198]. Така польова модель містить рівняння, які виражають фундаментальні закони фізики: закони збереження маси, імпульсу та енергії. Структуру польової моделі зображено на рис. 1.9.

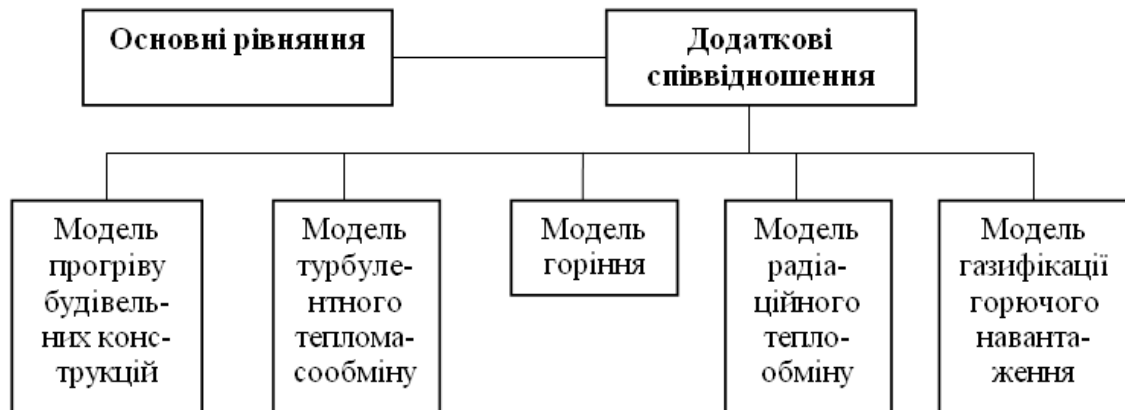


Рис. 1.9. Структура польової моделі [198]

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 суміші ідеальних газів;
- рівняння теплофізичних параметрів суміші.

Усі диференціальні рівняння приводяться до «стандартного» виду, зручного для числового розв'язку

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

де Φ – 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 й оптична густина диму); Γ – коефіцієнт дифузії для Φ ; S – член, що відповідає джерелу Φ .

Значення величин в залежності (1.1) наведено в роботі [198].

Результати розгляду наведених моделей показали, що вони використовувалися головню для аналізу пожеж у приміщеннях житлових будівель, торговельно-розважальних центрів, атриумів тощо. Зовсім не розглядалися питання прогнозування тепломасообміну при пожежі в приміщеннях деревообробних цехів з визначенням критичного часу пожежі для різних можливих ситуацій. Для розгляду пожежних ситуацій у деревообробних цехах найдоцільніше використовувати польову модель з програмним забезпеченням FDS, яка удосконалена і рекомендована роботою [199] для розгляду пожежних ситуацій у приміщеннях.

1.5.4 Моделі пожеж для відкритих складів лісоматеріалів

Найнебезпечнішими є пожежі на відкритих складах пиломатеріалів. Здебільшого вони мають вигляд масової пожежі. Першу роботу щодо розвитку й поширення пожеж на відкритих складах пиломатеріалів розглянули на 10-му Симпозіумі з процесів горіння на пожежах 1965 року в м. Піттсбург (США) за результатами досліджень [307]. Механізм поширення пожежі було представлено у вигляді розповсюдження іскор і головешок, що горять, які розлітаються під дією конвективної колонки, що утворюється над осередком пожежі. А, наприклад, в Росії пожежі і способи їх гасіння на відкритих складах

лісоматеріалів розпочали вивчати в 50-60-х роках минулого століття, використовуючи результати експериментальних досліджень на натурних об'єктах. Узагальнення цих результатів опубліковано у працях [139, 140].

На основі результатів робіт П. П. Девлишева та І. О. Іванова [74, 91] було отримано емпіричні залежності для визначення швидкості поширення фронту пожежі по штабелях на складах пиломатеріалів. Але ці залежності неможливо використовувати для розрахунку швидкості поширення фронту пожежі територією складу пиломатеріалів, тому що вони не враховують протипожежних розривів між штабелями. При розгляді процесу поширення пожежі по території складу пиломатеріалів враховують теплове випромінювання та вплив вітру на швидкість збільшення фронту пожежі, а також положення факела полум'я в просторі, тобто на його кут нахилу відносно вертикальної осі [314]. Крім цього, враховують перекидання вітром іскор і головешок, що горять, на деревину сусіднього штабеля, що також сприяє поширенню пожежі [133]. При перекиданні іскор на попередньо прогріту поверхню штабеля завдяки тепловому випромінюванню зменшується тривалість її спалаху. Для врахування сумісної дії теплового випромінювання і перенесених іскор на займання штабеля лісоматеріалів було запропоновано ймовірно-множинну модель [11, 70]. Відповідно до цієї моделі процес поширення пожежі на лісоскладі можна представити як сукупний розвиток об'єктів, які розміщені на площині.

Методи математичного моделювання розвитку пожеж на складах лісоматеріалів почали розвивати у 80-х роках минулого століття в Росії (ВНДІПО). При цьому розглядали питання, пов'язані з поширенням пожежі з урахуванням протипожежних і технологічних розривів між штабелями та завдяки випромінюванню тепла, конвекції, перенесенню іскор і головешок, що горять, а також вогневим вихорам, які рухаються. Усі наведені процеси сукупно впливають на динаміку пожежі на складах лісоматеріалів. Заслугове уваги математична модель для визначення швидкості збільшення фронту пожежі на складах круглого лісу з використанням множинно-рекурентного рівняння для

опису стану пожежі на лісоскладі Ω , яке зв'язує поточне і наступне положення фронту з полем випадкових кінцевих множин локального поширення в різних напрямках [134]. У 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 Ω_1 – границя лісоскладу;

Ω_2 – штабелі лісоматеріалів;

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

Відповідно з картою однорідності Ω для кожної Ω_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, застосувавши середньомірну ідентифікацію розвитку пожежі.

Розвиток пожежі на складах лісоматеріалів виконується головню за рахунок передачі тепла від штабеля до штабеля тепловим випромінюванням. У роботі [1] розглянуто передачу тепла випромінюванням від факела 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.

Автори роботи встановили, що кількість тепла, переданого випромінюванням, вчетверо перевищує кількість тепла, переданого теплопровідністю і конвекцією, що дає змогу розглядати передачу тепла від факела полум'я тільки випромінюванням.

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

У праці [21] отримано двомірну модель радіальної швидкості $V_w(\varphi)$ розповсюдження крайки пожежі в азимутальному напрямку φ 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;

β – 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;

φ – полярний кут (полярна вісь збігається з напрямком вітру).

Розглянуту модель можна використовувати в діапазоні $0 \leq v_w \leq 8$ м/хв. Потрібно відзначити, що в роботі [21] не достатньо розглянуто області використання моделі. Щодо поширення пожеж на лісоскладах наведена модель не враховує тривалості переходу пожежі від одного штабеля до іншого, що унеможлиблює її використання.

Математичні моделі стосовно динаміки пожеж та їх програмне забезпечення описано в роботах [81, 82, 90, 303, 305].

Для розроблення моделі динаміки контуру лісової пожежі в роботах [95, 96, 222] було використано 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.

У працях [131, 132, 184] для побудови контуру пожежі використовують ітераційні процедури з дискретним часовим кроком. Для цього застосовують годограф вектор-функції щільного розміщення, а контури вогнища і пірологічних об'єктів задають ламаною лінією. Ця модель дає змогу дуже схематично отримати динаміку контуру пожежі, що унеможлиблює її практичне застосування.

З іншого погляду, в більшості випадків пожежа на лісоскладах виникає на конкретному штабелі і розвивається в певному напрямку з урахуванням напрямку вітру та протипожежних і технологічних розривів між штабелями. Тому використовувати розглянуті в роботах [95, 96, 131, 132, 184, 222] моделі для прогнозування динаміки пожежі на лісоскладах недоцільно.

1.5.5 Обмеження розповсюдження пожежі на деревообробних підприємствах

До складу деревообробних підприємств входять: 1) деревообробні цехи (лісопильні, столярно-меблеві, складальні, клеєних матеріалів і деревно-волокнистих плит тощо); 2) відкриті склади лісоматеріалів.

Розглянемо основні обмеження розповсюдження (поширення) пожежі для цих підприємств.

Деревообробні цехи для обмеження поширення 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 евакуацією людей;
- системами протидимного захисту;
- пожежними відсіками;
- системами диспетчеризації СПЗ.

Системи пожежної сигналізації (СПС) призначені для раннього виявлення пожежі та подавання сигналу тривоги для вжиття необхідних заходів, які пов'язані з евакуацією людей, викликом пожежно-рятувальних підрозділів, запуском протидимних систем, пожежогасінням, здійсненням управління протипожежними клапанами, дверима, воротами та завісами (екранами), відімкненням або блокуванням (розблокуванням) інших інженерних систем та устаткування при сигналі «пожежа» [72, 277].

Компоненти систем пожежної сигналізації повинні відповідати вимогам серії стандартів ДСТУ EN 54 (усі частини розділу 2). При виборі пожежних оповіщувачів потрібно 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].

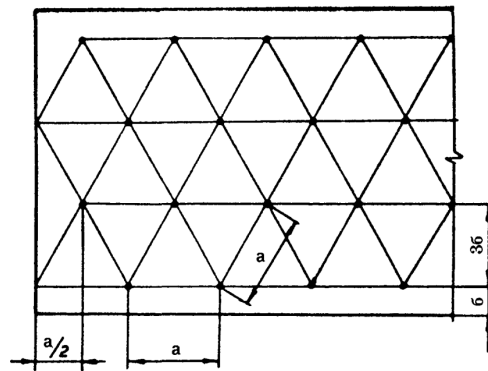


Рис. 1.10. Схема трикутного розміщення сповіщувачів

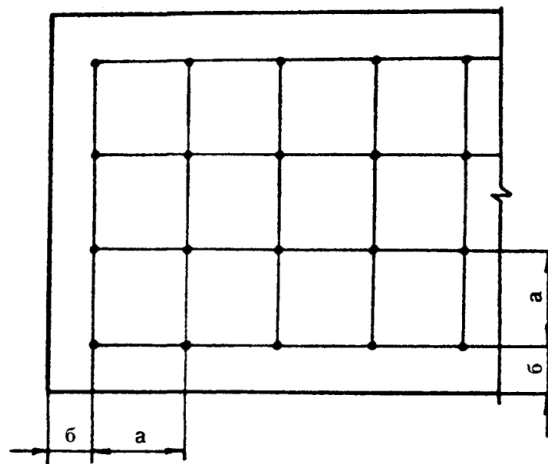


Рис. 1.11. Схема квадратного розміщення сповіщувачів

Максимальну відстань між тепловими пожежними сповіщувачами, сповіщувачами і стіною визначають за даними табл. 1.2.

Максимальну відстань між димовими пожежними сповіщувачами, сповіщувачем і стіною визначають за даними табл. 1.3. Окрім пожежних сповіщувачів, об'єкти можуть бути обладнані і мовленнєвою системою оповіщення про пожежу. Пожежні сповіщувачі потрібно використовувати 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	
	між сповіщувачами, а, м	від сповіщувача до стіни, б, м	між сповіщувачами, а, м	від сповіщувача до стіни, б, м
До 8,0	7,0	3,5	8,6	2,5
Понад 8,0 до 11,0	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.				

Автоматичні системи пожежогасіння (АСПГ) охоплюють: спринклерні та дренчерні установки; системи порошкового, газового та аерозольного пожежогасіння [4, 5]. Вибирати АСПГ слід з урахуванням характерних небезпечних чинників можливої пожежі, а також впливу вогнегасної речовини на довкілля та людей [72]. АСПГ, окрім спринклерних, мають бути оснащені ручним пуском. Автоматичний пуск АСПГ повинен відбуватися при спрацюванні двох пожежних сповіщувачів або двох технологічних давачів.

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.

Таблиця 1.3

Максимальна відстань між димовими пожежними сповіщувачами, сповіщувачем і стіною [72]

Висота приміщення, що захищається, м	Схема квадратного розміщення сповіщувачів		Схема трикутного розміщення сповіщувачів	
	Максимальна відстань, м		Максимальна відстань, м	
	між сповіщувачами, а, м	від сповіщувача до стіни, б, м	між сповіщувачами, а, 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.				

Системи оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей (СО) призначені для оповіщення людей, що знаходяться в приміщенні цеху, про виникнення пожежі, щоб створити умови для їх своєчасної евакуації [173, 214]. Оповіщення здійснюють одним з 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 евакуації та дії, що забезпечують особисту безпеку;
- увімкненням світлових покажчиків рекомендованого напрямку евакуації;
- увімкненням освітлення евакуації.

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

- в автоматичному режимі сигналом від СПС;

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

Зони оповіщення визначають за такими показниками:

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

- можливими шляхами поширення пожежі;

- умовами та шляхами евакуації людей.

Настінні звукові оповіщувачі та гучномовці потрібно встановлювати так, щоб відстань між верхньою частиною оповіщувача і рівнем підлоги була не менше як 2,2 м, а відстань між верхньою частиною оповіщувача та рівнем стелі – не менше як 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 в разі неможливості забезпечити оповіщення звуковими та мовленнєвими оповіщувачами [72, 276].

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 для:

- гарантування умов для безпечної евакуації 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 м². Приміщення площею понад 1600 м² необхідно поділяти на димові зони відповідно до можливості виникнення пожежі в одній з них. Площа димової зони не повинна перевищувати 1600 м². 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, 280].

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

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 приймально-контрольні пожежні прилади та обладнання СПЗ;

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

Щодо протипожежних дверей, клапанів, воріт, завіс (екранів) [72], то у приміщенні пожежного поста має бути така інформація про нормальне їх функціонування:

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).

2) звукова сигналізація про несправність.

Після розгляду й аналізу систем протипожежного захисту деревообробних цехів для обмеження поширення пожежі можна зробити такі висновки:

- наявні системи протипожежного захисту дійсно забезпечують обмеження поширення пожежі, яка може виникнути в деревообробному цеху;
- не розглядаються методи для визначення складу систем протипожежного захисту, виходячи з конкретних умов в кожному деревообробному 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 мають бути обладнані: 1) пожежною сигналізацією; 2) протипожежним водопостачанням; 3) пожежною технікою з урахуванням протипожежних заходів.

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 як 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 має здійснюватися за допомогою гучномовного розпорядливо-пошукового диспетчерського зв'язку та звукової сигналізації (сирени, дзвони тощо).

На відкритих складах лісоматеріалів із сумарною місткістю до 10 000 м³ слід передбачати протипожежний водопровід низького тиску, а понад 10 000 м³ лісоматеріалів – протипожежний водопровід високого тиску. Тривалість гасіння пожеж слід приймати не менше 5 годин для відкритих складів лісоматеріалів. Витрати води на зовнішнє гасіння пожежі на відкритих складах лісоматеріалів потрібно приймати не менші за величини, вказані в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Розхід води на гасіння пожежі [52]

Вид і спосіб зберігання лісоматеріалів	Витрати води на гасіння пожежі, л/с, при сумарній місткості складів лісоматеріалів, щільних м ³			
	до 10000	більше 10000 до 100000	більше 100000 до 500000	більше 500000
Відкриті склади:				
пиломатеріали 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 потрібно розміщувати на відстані не менше як 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 ніж 100 м один від одного. Відстань від пожежних гідрантів до штабелів і куп відкритого зберігання повинна бути не менше як 8 м і не більше ніж 25 м.

Всмоктувальних ліній до насосної станції та напірних ліній від насосної станції до мережі протипожежного водопроводу має бути щонайменше дві. Насосні станції слід розміщувати на відстані не менше ніж 40 м від штабелів і куп лісоматеріалів, в окремих будинках чи прибудовах, а також у приміщеннях будинків на перших, у цокольних і підвальних поверхах, відокремлених від інших приміщень протипожежними перемичками 1-го типу та перекриттями 3-го типу і мають безпосередній вихід назовні. Насосні станції, як правило, потрібно 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 потрібно 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 як 60 л/с при тиску в насадці ствола 0,5 МПа.

Кількість 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 ² ·с ⁻¹		
	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
Примітка. Склад бентоніту, % по масі: бентонітовий глинопорошок – 15-20; піноутворювач – 2; вода – 77-82; карбоксиметилцелюлоза – 0,1 по відношенню до кількості бентоніту; сода кальцинована – 1. Склад бішофіту, % по масі: хлористий магній – 96; сульфат кальцію, хлористий кальцій, хлористий натрій та ін. – 4. 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 потрібно встановлювати від основи штабеля або купи лісоматеріалів на відстані не менше як 7 м. Лафетні вишки слід передбачати з негорючих матеріалів IV ступеня вогнестійкості, класів конструктивної пожежної небезпеки С0, С1. Майданчики для встановлення лафетних стволів треба передбачати розміром у плані не менше 2,5х2,5 м або радіусом не менше як 1,5 м з огорожею заввишки 1,2 м.

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

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

Підіймально-транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння на відкритих складах лісоматеріалів потрібно розміщувати на відстані не менше як 15 м від штабелів. Площа навколо цих засобів має бути вільною від кускових відходів і кори. Паливо для заправки двигунів можна зберігати в кількості не більше однієї бочки на відстані не менше як 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 й аналізу систем протипожежного захисту складів лісоматеріалів для обмеження поширення пожежі можна зробити такі висновки:

- наявні системи протипожежного захисту дійсно забезпечують обмеження поширення 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 виконуваних робіт: на дільницях складання пожежне навантаження становить приблизно 50 кг/м²; у цехах фанерного виробництва – 140...170 кг/м²; у заготівельних і верстатних цехах – близько 200 кг/м²; на відкритих складах лісоматеріалів – 500...700 кг/м² [141, 181]. Найбільш пожежонебезпечними дільницями деревообробних підприємств є сушильні камери, оздоблювальні цехи та дільниці 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 змолуєчів, повітряно-механічну піну різної кратності, водяну пару і негорючі гази [32, 52, 141, 142, 181, 210, 278, 292]. При гасінні пожежі у відділеннях, в яких є устаткування для нагріву сушильних камер, не бажано подавати воду на нагріті поверхні. У цьому випадку використовують повітряно-механічну піну або вогнегасні порошки [181].

При ліквідації пожежі у складальних, меблевих, фанерних, тарних та столярних цехах пожежа швидко поширюється по заготовкам, відходах, системам пневмотранспорту. У цьому випадку необхідно насамперед швидко вводити пожежні стволи на шляхах поширення вогню [31, 141, 181, 211].

Основним вогнегасним засобом гасіння пожежі на лісоскладах є вода. Так, водою гасять понад 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 відповідно до оперативного плану [207]. Перші підрозділи на гасіння подають стволи А зі знятими насадками. Якщо пожежа є на початковій стадії, то доцільно одночасно використовувати водяні і пінні стволи: водяні – на гасіння пожежі, а пінні – на захист штабелів [141]. Практика гасіння пожеж на лісоскладах показує, що коли на початковому етапі не забезпечити потрібної інтенсивності подачі вогнегасного засобу на вирішальному напрямку, то пожежа стає затяжною і розповсюджується на велику площу [52, 141]. Оперативне розгортання організують по периметру пожежі. У процесі гасіння пожежі спочатку збивають полум'я із зовнішніх поверхонь штабеля для зменшення впливу теплового випромінювання, а потім подають струмені всередину штабеля з боку торців для їх проливання. При гасінні пожеж на лісоскладах внаслідок їх швидкого поширення, особливо при сильному вітрі, необхідно заздалегідь визначити рубежі вимушеного відступу через загрозу оточення підрозділу пожежею. Для активного наступу на вогнище ствольники повинні підходити до нього якнайближче, 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]. Номограму для експрес-розв'язку прямої і зворотної задач пожежогасіння зображено (рис. 1.12).

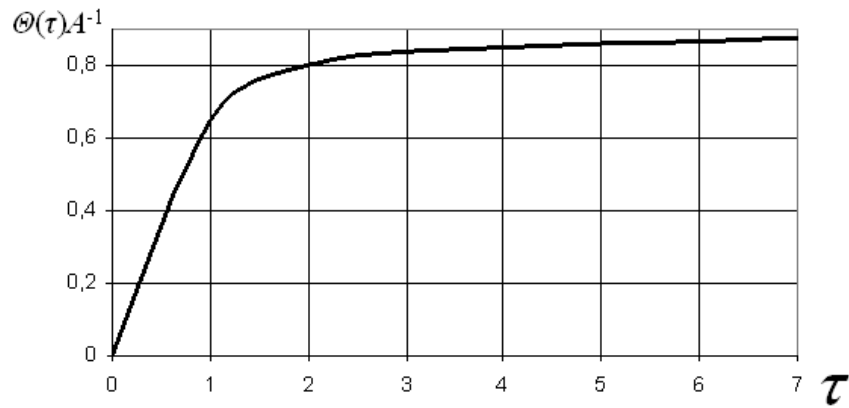


Рис. 1.12. Номограма для експрес-рішення прямої і зворотної задач пожежогасіння

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;

λ – коефіцієнт теплопровідності, яка горить;

V – лінійна швидкість розповсюдження пожежі.

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

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

У роботі [154] отримано математичну модель для визначення часу гасіння пожеж класу А в закритих приміщеннях. Цей час складається з часу локалізації $\tau_{лок}$ пожежі і часу гасіння τ_z , тобто

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

де $S_{лок}$ – площа локалізації, м² (для кругової і кутової пожеж)

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

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

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

$V_{л}$ – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/хв;

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

N_A, N_B^{Γ} – кількість пожежних стволів А і В на гасіння відповідно;

$K_I = 1,62 - 3,04 I_n^{\Gamma}$ – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання I_n^{Γ} (л/м²с) в осередок пожежі вогнегасної речовини (рекомендоване значення для ручних стволів $I_n^{\Gamma} = 0,2$ л/м²с);

$K_d = 1,4983 - 0,0262d$ – 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 разі використання стволів А і В приймають середнє значення $d = 16$ мм);

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

$S_{\text{п}}$ – площа пожежі, м².

Наведені залежності для визначення тривалості гасіння пожеж від їх класу можна використовувати для практичних розрахунків.

Результати розгляду й аналізу сучасного стану гасіння пожеж на деревообробних підприємствах показали, що:

- 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 оперативно-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 пожежників, їх бойової готовності, мобільного керування тактикою гасіння та надійності пожежної техніки. З наведеного переліку чинників, які впливають на процес ліквідації пожежі, найвпливовішим є надійність пожежної техніки. Наприклад, у роботі [53] вказується, що внаслідок відмов пожежної техніки в процесі ліквідації пожежі її тривалість може збільшуватися в 1,25...2 рази, що призведе до збільшення втрат і для об'єкта, 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 чинних стандартів

щодо 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 довідкової літератури показали, що для пожежно-рятувального обладнання і техніки відсутні значення основних показників надійності. У деяких стандартах наведено тільки значення напрацювання на відмову, але в більшості випадків вони не є обґрунтованими. Тому є потреба визначити бодай трохи наближені до дійсних значень основні показники надійності пожежної техніки для локалізації та гасіння пожежі, що дасть змогу з їх урахуванням забезпечити якісний процес ліквідації пожежі.

Перші дослідження надійності технічних об'єктів стартували на початку 1945 року в США. Причиною послугували численні 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 виконувати роботи з проведення експериментальних досліджень для визначення фактичної надійності, на цій основі виникла математична теорія надійності. Вагомий внесок у цьому напрямі зробили Б. І. Костецький, О. С. Проніков, Д. М. Решетов та багато інших науковців.

Стосовно надійності пожежної техніки в 90-х роках минулого століття були розроблені ДСТУ, в яких почали вводити значення показників надійності. Наприклад, у 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 неможливо щось прогнозувати стосовно ймовірності безвідмовної роботи. До того ж, наведене значення $T_B = 100$ год не є обґрунтованим.

У 1988 році вийшла праця [206], у якій для уточнення T_B запропоновано метод статистичного моделювання, тобто методику для уточнення значень

показників надійності. В Україні одними з перших робіт, які були присвячені визначенню основних показників надійності пожежної техніки, були праці [54, 155]. Аналізуючи результати цих робіт, можна зазначити, що наведена методика визначення основних показників надійності пожежної техніки ґрунтується на даних напрацювання на відмову T_B , які наведено в ДСТУ. При цьому не враховувалося зменшення тривалості напрацювання на відмову внаслідок певного часу експлуатації пожежної техніки, а також надійність її структурних складових. Однак попри такі результати досліджень проблема полягає в тому, що науковці не розглядали визначення основних показників надійності для пожежної техніки як для системи, яка складається з багатьох складових елементів.

Результати розгляду й аналізу сучасного стану надійності пожежної техніки та спорядження дозволили зробити такі 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 передусім 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 призвести 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 від межі вогнестійкості.

Для визначення межі вогнестійкості несучих будівельних конструкцій використовують експериментальний і розрахунковий методи. Експериментальні методи дають змогу отримати точні дані, але вони дорогі. Наприклад, за даними роботи [284], вартість розрахункових методів визначення вогнестійкості становить менше ніж 1% вартості експериментальних випробувань.

Методика розрахунку на вогнестійкість 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 досліджено у праці [203]. В результаті цієї роботи отримано такі дані:

1. Підвищення вогнестійкості завдяки збільшенню 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 наведено на рис. 1.13.

З аналізу рис. 1.13 видно, що при товщині захисного шару 20 мм час втрати несучої здатності дорівнює 37 хв. У 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 завдяки нанесенню захисного покриття. Такими захисними покриттями можуть бути: цементно-піщана штукатурка; гіпсова штукатурка; покриття з силіційорганічними наповнювачами. Результати досліджень показали, наприклад, що при нанесенні 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.

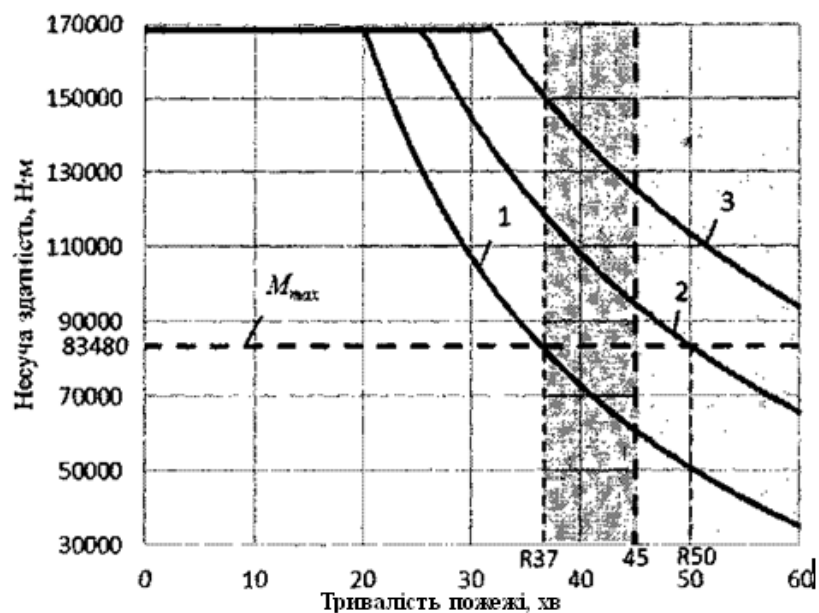


Рис. 1.13. Зміна межі вогнестійкості за несучою здатністю R [136]:
1 – при товщині захисного шару 20 мм; 2 – 25 мм; 3 – 30 мм

3. Підвищення вогнестійкості завдяки використанню 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. У цьому випадку вогнестійкість досягає 69 хв.

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

- у науково-технічній літературі немає даних щодо визначення межі вогнестійкості будівельних конструкцій скатних покрівель цехів;
- відсутні дані і методи з підвищення межі вогнестійкості будівельних конструкцій скатних покрівель цехів;
- відсутність даних щодо межі вогнестійкості будівельних конструкцій скатних покрівель цехів унеможливорює прогнозування в повному обсязі успішного виконання роботи пожежно-рятувальних підрозділів для ліквідації пожеж у цехах деревообробних підприємств.

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 через наявність у них горючого пилу, що утворює пилоповітряні суміші, а також відходів механічної обробки та твердих горючих матеріалів.

2. Результати розгляду й аналізу математичних моделей тепломасообміну при пожежі в приміщеннях цехів деревообробних підприємств показали, що їх використовували головню для аналізу пожеж у приміщеннях житлових будівель, торговельно-розважальних центрів, атриумів тощо. І зовсім не розглядали питання прогнозування тепломасообміну при пожежі в приміщеннях деревообробних цехів з визначенням критичного часу пожежі для різних можливих ситуацій.

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

4. Щодо використання математичних моделей лісових пожеж для моделювання пожеж на відкритих складах лісоматеріалів можна зауважити, що лісові пожежі поширюються 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 за наявного стану обмеження поширення пожежі в деревообробних цехах не розглядаються методи для визначення складу систем протипожежного захисту, виходячи з конкретних умов у кожному 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. Наявні системи протипожежного захисту відкритих складів лісоматеріалів забезпечують обмеження поширення пожежі, яка може виникнути на їх території. Для оцінки забезпеченості відкритого складу лісоматеріалів системами протипожежного захисту не розроблено критеріїв для його достатнього протипожежного захисту на випадок виникнення пожежі та її оперативної ліквідації. Відсутня методологія прогнозування забезпеченості відкритих складів лісоматеріалів системами протипожежного захисту.

7. Немає обґрунтованих методів 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 потрібно 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 цих питань ще не розглядали.

10. У науково-технічній літературі немає даних щодо визначення межі вогнестійкості будівельних конструкцій скатних покрівель деревообробних цехів. А це унеможливорює прогнозування в повному обсязі успішної ліквідації пожеж у 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 наявних просторових конструкцій приміщень. Деревообробна галузь об'єднує велику групу виробництв, які пов'язані з механічною обробкою деревини.



Рис. 2.1. Схема класифікації споруд деревообробних підприємств

Цю галузь можна поділити на чотири основні групи виробництв:
1) лісопильно-деревообробні; 2) клеєних матеріалів і плит; 3) виробів з

деревини; 4) спеціальні [165]. Для кожної із цих груп виробництв використовують відповідні споруди з певними типами конструкцій виробничих приміщень і складів. Схему класифікації споруд деревообробних підприємств зображено на рис. 2.1.

Найпоширеніші закриті приміщення цехів деревообробних підприємств із сіткою колон ($b \times l$) 18 x 6, 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.

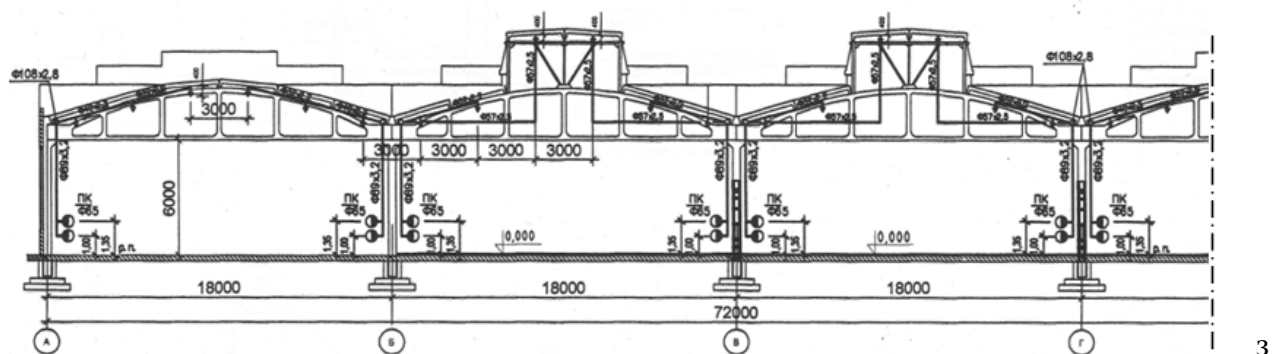


Рис. 2.2. Вид поперечного перерізу опоряджувально-складального цеху деревообробного підприємства (м. Самбір Львівської області, вул. В. Чорновола, 36)

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 (можна також використовувати УТС з розмірами 72x72 м). За необхідності довжина L може бути збільшена за рахунок прибудови до неї кількох прольотів [229]. Прольоти УТС можуть бути з вентиляційними ліхтарями і без них. Висота одноповерхових УТС до ферм може бути залежно 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 кг/м^2 . Воно залежить передусім від виду обладнання та оброблювальних заготовок. Огороджувальні стіни між відділеннями, які утворюють пожежні відсіки, із цегли.

2.2 Моделювання прогнозування розповсюдження пожежі в закритих приміщеннях

За результатами експериментальних досліджень, отриманих у ВНДПЗ (Росія), розроблено 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 [135]. Отримані результати були значним внеском 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 розроблено пакети прикладних програм, за допомогою яких можна виконувати з використанням комп'ютера дослідження процесів поширення пожежі в приміщенні [266]. Прикладом таких програм є програма FDS, розроблена Лабораторією будівельних і пожежних досліджень (BFRL) Національного інституту стандартів і технологій США [199].

Іншою такою розробкою є програмний комплекс SOFIE [189, 310]. Цей комплекс використовує математичну модель, яка охоплює: рівняння

нерозривності, три рівняння збереження імпульсу уздовж кожної з координат, рівняння збереження енергії, рівняння перенесення для маси пари палива і функції змішування, а також рівняння $k - \varepsilon$ 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 теплопереносу використовувалася спрощена χ_R -модель. Згідно з 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 атріумах багатоповерхових будівель. Результати цих досліджень показали, що найбільша небезпека при прогнозуванні пожежі – це пожежі, які виникають на першому поверсі. У цьому випадку є можливість поширення диму всіма поверхами через вільний об'єм атріуму.

Проблема полягає в тому, що досі науковці не розглядали моделювання пожежних ситуацій в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств для встановлення швидкості поширення пожежі, визначення тривалості вільного розвитку пожежі до початку її гасіння та критичного часу пожежі, за який можна евакуювати працівників цеху.

Тож актуальним є завдання розглянути і проаналізувати пожежні ситуації в закритих приміщеннях деревообробних підприємств з визначенням швидкості поширення пожежі та її критичного часу. Для вирішення такого завдання доцільно використовувати систему FDS, яка удосконалена ТОВ «Сітіс» (м. Єкатеринбург, Росія) [199] і яка дозволяє виконувати прогнозування поширення пожежі для різних об'єктів. Ця система побудована на використанні рівнянь, які описують [46]:

– 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 ρ – густина середовища (невідома величина), кг/м³; 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

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

де $X_i = \rho_i / \rho$ – масова концентрація i -го компонента суміші газів; D_i – коефіцієнт дифузії i -го компонента газу, м/с²; $(m_i)_{xim}$ – кількість виділеного i -го продукту горіння за одиницю часу на одиницю об'єму, кг/(м³·с);
 – закон збереження імпульсу

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

де p – тиск, Па; σ_{ij} – тензор в'язких напружень, Па; g – прискорення вільного падіння, м/с²;

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 із [111]

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

де τ_{ij} – символ Кронекера ($i=j \rightarrow \tau_{ij}=1$, $i \neq j \rightarrow \tau_{ij}=0$); μ – 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; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C);

T – температура, °C; 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 ε – ступінь чорноти, α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·°C); φ – кутовий коефіцієнт; $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²K⁴) – стала Стефана-Больцмана;

– теплообмін з огорожувальними конструкціями

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

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°C; c – питома теплоємність матеріалу, Дж/кг·°C; ρ – густина матеріалу, кг/м³;

– густина теплового потоку випромінюванням, Вт/м²

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

де T_w – температура огорожувальної конструкції, °C;

– рівняння стану газу

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

де R – постійна газова стала, Дж/(моль·°C); M – молярна маса суміші газів, кг/моль;

– відстань R_n , на яку розповсюджується полум'я пожежі

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

де v – лінійна швидкість розповсюдження полум'я, м/с; τ – тривалість пожежі, с;

– кількість газів, що виділяються за одиницю часу

$$(m_i)_{xim} = \frac{\eta \psi S_{\Pi} L_i}{\Delta V}, \quad (2.11)$$

де η – коефіцієнт повноти згоряння; ψ – питома швидкість вигорання горючого матеріалу, кг/(м²·с); S_{Π} – площа пожежі, м²; L_i – кількість виділеного i -го компонента газу з 1 кг матеріалу, кг/кг; ΔV – об'єм прилеглих комірок до осередку пожежі, в які проходить виділення, м³;

– питома тепловиділення від зони горіння в прилеглі комірки, в які здійснюється теплообмін

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

де Q_0 – найнижча теплота згоряння 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; ψ , кг/м²с; 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 їхніх параметрів, а саме λ , Вт/м⁰С; c , Дж/кг⁰С; ρ , кг/м³.

Окрім 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 ⁰С в будь-якій точці закритого приміщення з урахуванням температури осередку пожежі. При цьому використовували основну залежність [46]

$$T_i = T_{o.n.} \cdot \frac{C_T \cdot G^{0,75} \cdot \tau_{в.г.}^{0,18} \cdot Z^{1,5} \cdot S_n^{0,13}}{R^{0,71}}, \quad (2.13)$$

де $T_{o.n.}$ – температура осередку пожежі; G – пожежне навантаження в приміщенні, кг/м²; $\tau_{в.г.}$ – час вільного горіння, хв; Z – висота, на якій визначається температура, м; S_n – площа пожежі, м²; R – відстань, на якій визначається температура, м; C_T – коефіцієнт пропорційності та обезрозмірювання складових елементів дробу

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

Для визначення температури $T_{o.n.}$ в ⁰С осередку пожежі використовували залежність [112]

$$T_{o.n} = \frac{10^3 Q_{n.p.cер} S_n \tau_{n.г}}{c_{сер} M} - 273, \quad (2.14)$$

де $Q_{n.p.cер}$ – середнє значення найнижчої робочої теплоти згоряння для приміщення, в якому розглядається пожежа, МДж/(м²·хв); M – сумарна маса матеріалів пожежного навантаження, яка знаходиться на площі пожежі, кг; $c_{сер}$ – середнє значення питомої теплоємності горючого навантаження, кДж/кг·К; $\tau_{n.г}$ – 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) [46, 275]. Загальна характеристика цеху: загальна площа приміщень – 14 256 м²; висота цеху до ферм – 6 м; об'єм приміщень до ферм – 85 536 м³; довжина цеху з кроком колон 6 м – 192 м; ширина цеху – 72 м; пожежне навантаження – 200 кг/м². Огороджувальні конструкції стін між відділеннями – цегляні. Загальна кількість евакуаційних виходів 6, а тих, хто працює в одну зміну, – 152 особи. Загальний вид цеху зображено на рис. 2.3, а план його компонування – на рис. 2.4.

Розглянемо моделювання пожежних ситуацій у приміщеннях цеху деревообробного підприємства (м. Самбір) для встановлення швидкості поширення пожежі, визначення тривалості вільного розвитку пожежі до початку її гасіння та критичного часу пожежі, за який можна евакуювати працівників цеху.



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

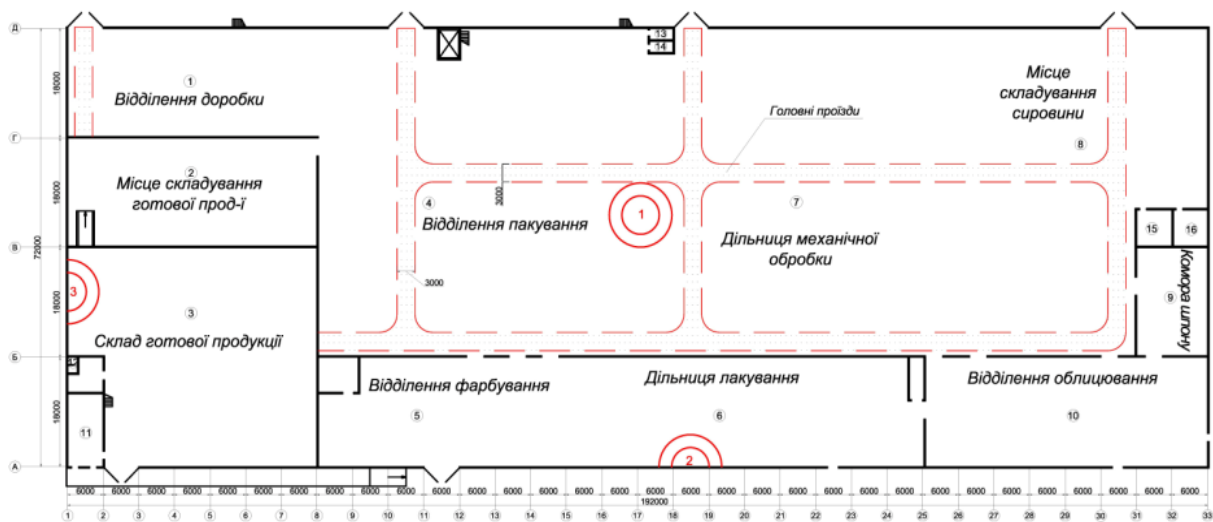


Рис. 2.4. Компонувальний план опоряджувально-складального цеху

Такими пожежними ситуаціями можуть бути (рис. 2.4):

- кругова пожежа в центрі цеху у відділенні пакування (осередок займання 1 знаходиться в осях В-Г і між колонами 17-18);
- кутова пожежа (180°) у відділенні лакування (осередок займання 2 знаходиться в осях А-Б і між колонами 18-19);
- кутова пожежа (180°) на складі готової продукції (осередок займання 3 знаходиться в осях Б-В і між колонами 1-2).

Для визначення критичного часу пожежі враховуємо значення допустимої концентрації токсичних речовин для життєдіяльності людини. Критичне значення густини кисню $\rho_{O_2к} = 0,226 \text{ кг/м}^3$, 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 [46] першу пожежну ситуацію, коли прогнозований осередок кругової пожежі виник у центральній частині цеху (рис. 2.5).

У 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 2-й хвилині досягає 420 °C (рис. 2.6). Покрівля цеху, до якої доходить конвективна колонка, знаходиться вище від основи ферми на 3 м і на рис. 2.6 її не зображено.

З аналізу ізотерм видно, що на висоті до 2 м від підлоги температура середовища не перевищує 58 °C.

Результати досліджень показали, що на 6-й хв пожежі центральна частина цеху перебуває 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 м² кожна з температурою навколишнього середовища цеху до 70 °C. На цих площах розміщено по одному евакуаційному виходу, тобто при сповіщенні про пожежу в центрі цеху працівники цеху повинні збиратися для евакуації на цих площах.

На 10-й хв пожежі на складі готової продукції температура середовища не перевищувала 30 °C, а у відділеннях складування готової продукції, фарбування та лакування температура середовища не перевищувала 100 °C.

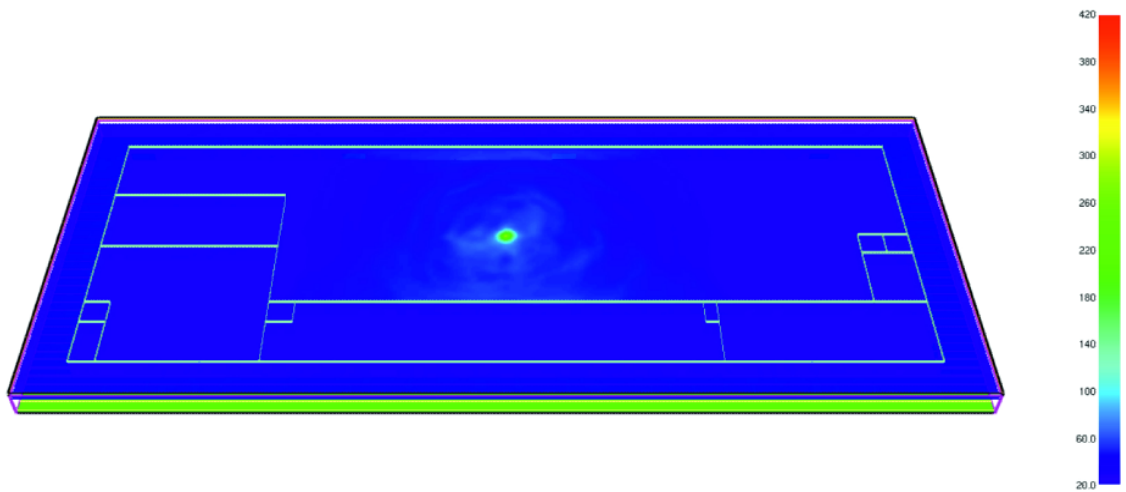


Рис. 2.5. Осередок кругової пожежі на 2-й хв, який знаходиться в центральній частині цеху

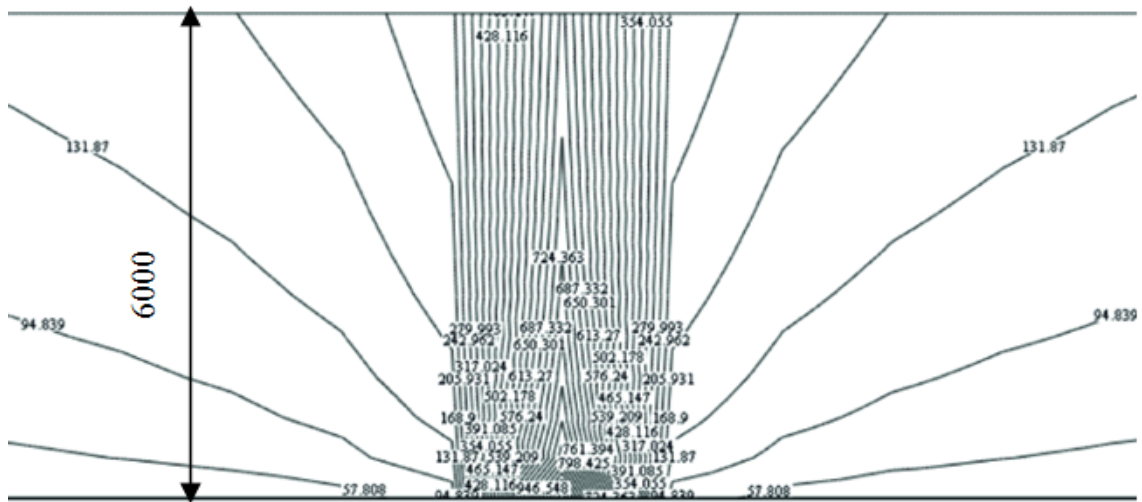


Рис. 2.6. Розміщення ізотерм у вертикальному перерізі цеху по висоті 6 м (6000 мм) на 2-й хв пожежі

Водночас у відділені облицювання температура середовища доходила до 125 °С, у коморі шпону – до 138 °С. На 15-й хвилині від початку пожежі цех був охоплений полум'ям.

При пожежній ситуації, коли пожежа розпочалася в центральній частині цеху, швидкість поширення вогню по довжині цеху L_y буде

$$v = \frac{L_y}{2\tau_{e.p}} = \frac{192}{2 \cdot 15} = 6,4 \text{ м/хв.}$$

Аналізуючи отриманий результат, встановлюємо, що швидкість розповсюдження пожежі дуже велика. Недоліком конструкції цеху, який розглядаємо, є те, що необхідно було б усі відділення відокремлювати одне від одного огорожувальними конструкціями, які в декілька разів зменшують швидкість теплопередачі і, відповідно, швидкість поширення пожежі. Крім цього, треба зауважити, що за 15 хв не мають змоги прибути на місце виникнення пожежі пожежно-рятувальні підрозділи Державної служби цивільного захисту (у найкращому випадку, коли на об'єкті встановлені пожежні сповіщувачі, час гасіння пожежі може початися тільки через 20...25 хв вільного розвитку пожежі). 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.

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 $\tau_{в,р} = 9,4 \text{ хв}$ (залежність 2, рис. 2.7), а оксиду вуглецю за цей же час – $K_{CO} = 1,4 \text{ г/м}^3$ (залежність 3, рис. 2.7).

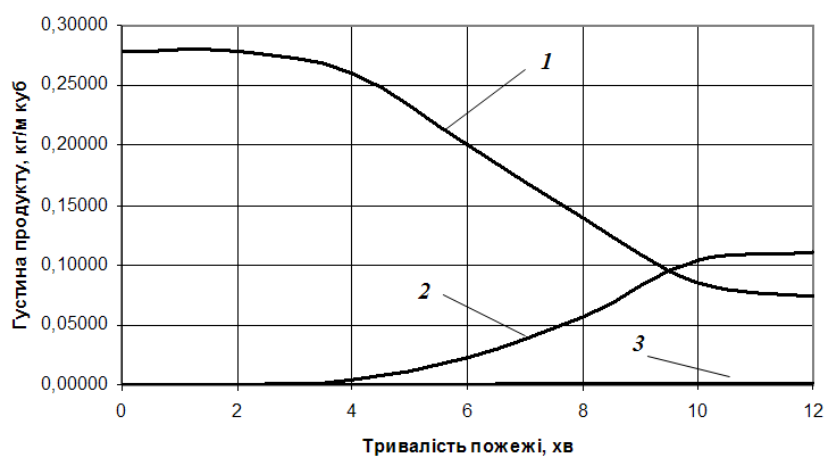


Рис. 2.7. Вплив тривалості вільного розвитку пожежі на зменшення густини кисню – 1, на виділення двоокису вуглецю – 2 та оксиду вуглецю – 3

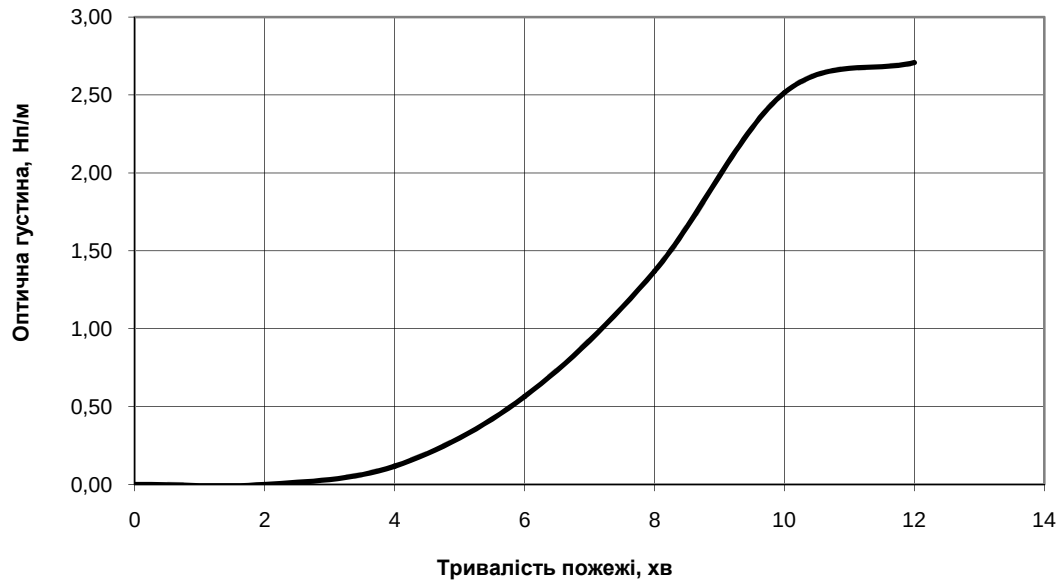


Рис. 2.8. Вплив тривалості вільного розвитку пожежі на значення оптичної густини диму

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

Отже, прогнозування виникнення та поширення пожежі в приміщенні опоряджувально-складального цеху за допомогою польового методу математичного моделювання пожеж у приміщеннях з використанням програми FDS дав змогу встановити критичний час пожежі.

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.

На підставі отриманих даних встановлюємо, що критичний час пожежі становить $\tau_k = 5,3$ хв. Успішність проведення евакуації працівників цеху встановлюється після визначення імовірності її виконання за залежністю [156, 217]

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

де τ_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 обладнані 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 з рекомендаціями [156], середня швидкість по горизонтальній поверхні коливається в межах 66...90 м/хв;

$$L_e = k_{кр} \sqrt{L^2 + B^2};$$

$k_{кр} = 1,4$ – 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 від кількості людей, які будуть на ній, тобто

$$Nq \leq LB,$$

де N – загальна кількість працівників, яка розміщується на площадці для евакуації; q – густина людського потоку при евакуації в приміщенні з використанням горизонтального шляху ($q = 0,51$ люд./м² [156]).

Для ситуації виникнення та розповсюдження пожежі, яку розглядаємо, вихідними положеннями при визначенні імовірності успішної евакуації працівників з опоряджувально-складального цеху є: $\tau_k = 5,3$ хв; загальну кількість працівників розділяємо на два потоки $N_1 = N_2 = 76$ людей; 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./м²; $V_e = 80$ м/хв; $\tau_{n.e} = 3,5$ хв.

Визначаємо $N_1q = N_2q = 76 \cdot 0,51 = 38,8$ м² < 600 м², 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 працівників з опоряджувально-складального цеху

$$P_{ев.л} = \frac{0,8 \cdot 5,3 - 0,75}{3,5} \approx 1.$$

Отже, за умови, що системи сповіщення про пожежу спрацюють справно і буде проведена на високому рівні організаційна робота з евакуації в умовах надзвичайної ситуації (пожежа), – усіх працівників цеху евакуюють із зони пожежі в безпечне місце.

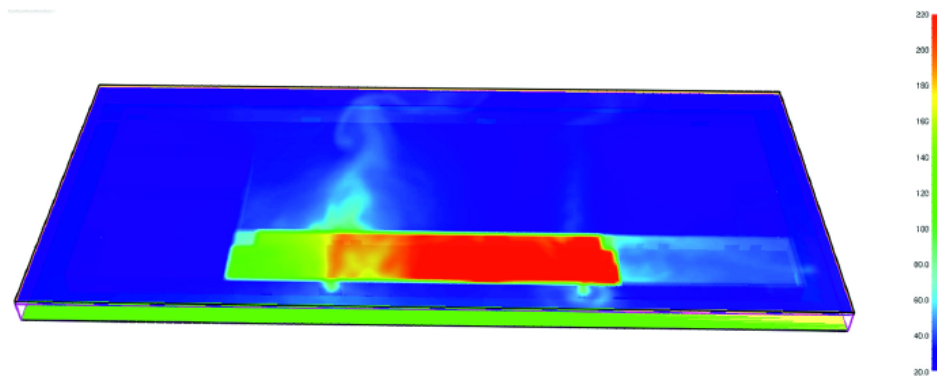


Рис. 2.9. Розповсюдження кутової пожежі (180°) лакувального відділення по лакувальному і фарбувальному відділеннях на 6-й хв

Розглянемо [46] 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-й хв зображено на рис. 2.9. Аналізуючи результати моделювання прогнозованої пожежі, можна зробити такі висновки. За 6 хв пожежа поширилась не тільки по лакувальному відділенню, а й у відділення фарбування та через проходи огорожувальних конструкцій цих відділень почала переходити до відділень облицювання і пакування, тобто на основну площу цеху. На 8-й хв полум'я пожежі поширюється на комору шпону і далі на місце складування сировини та дільницю механічної обробки (рис. 2.10).

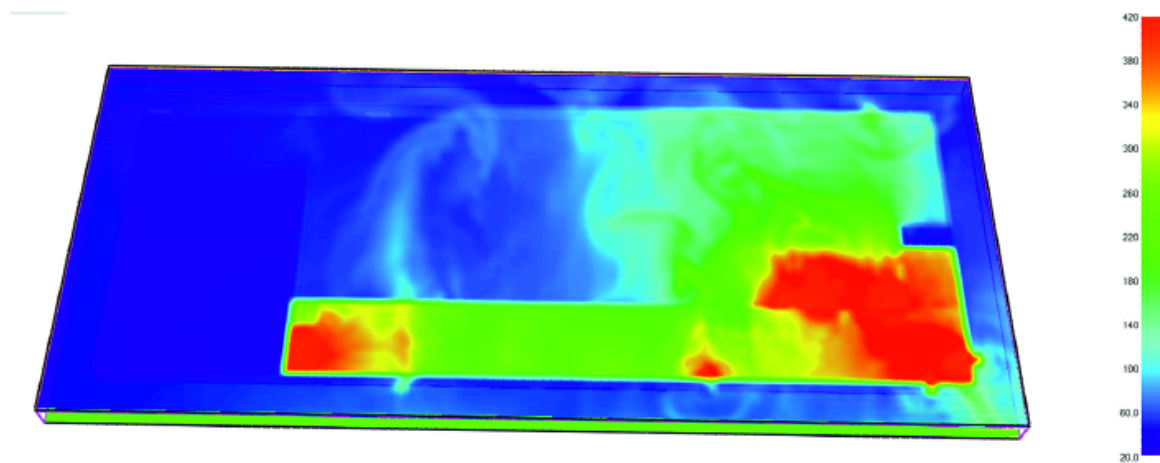


Рис. 2.10. Розповсюдження кутової пожежі (180°) лакувального відділення по площі цеху на 8-й хв

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

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

1) критична для людини температура, яка не перевищує 70°C , виникла за повних 8 хв пожежі на загальній площі 1836 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 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 $\tau_k=7$ хв, тобто збільшився на 32% у порівнянні з першою пожежною ситуацією, що забезпечує успішну евакуацію працівників через два евакуаційні виходи, які розміщені в межах колон 1-14 зі збором працівників для евакуації на площі 1836 м^2 лівої половини цеху.

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 поширення полум'я по цеху у другій пожежній ситуації становила $4,8 \text{ м/хв}$.

Розглянемо [46] 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 дали змогу зробити такі висновки. На 6-й хв пожежа поширилась 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-ї колони до 17-ї за $8,4 \text{ хв}$ зі швидкістю $6,4 \text{ м/хв}$. Отож, за $18,4 \text{ хв}$ пожежею охоплена ліва половина цеху, а за $33,4 \text{ хв}$ – весь цех. Евакуацію працівників у цьому випадку треба виконувати з правої сторони цеху, використовуючи один евакуаційний вихід між колонами 29-33 та два допоміжні з відділення облицювання. Критичний час пожежі в цьому випадку обмежується зменшенням густини кисню до критичного значення за $13,5 \text{ хв}$, що повністю

забезпечує успішну евакуацію працівників цеху. У третій пожежній ситуації критичний час пожежі становить $\tau_k=13,5$ хв, тобто він збільшився у 2,5 разу у порівнянні з першою пожежною ситуацією. Підтвердженням збільшення критичного часу пожежі знову є огорожувальні конструкції, які значно зменшують швидкість поширення полум'я.

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

- найбільша швидкість розповсюдження пожежі в цеху є в разі її виникнення в центральній частині приміщення за відсутності огорожувальних протипожежних конструкцій;
- результати аналізу часу поширення 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 при таких підприємствах необхідно організовувати добровільні пожежно-рятувальні підрозділи для ліквідації пожежі з відповідними технічними засобами;
- у приміщеннях деревообробних підприємств необхідно влаштовувати протипожежні огорожувальні конструкції (протипожежні відсіки) з відповідними проходами і проїздами, що дасть змогу зменшити швидкість поширення полум'я по цеху в декілька разів;
- для успішної евакуації працівників з приміщення, в якому виникла пожежа, необхідно його обладнати пожежними сповіщувачами і оповіщувачами та достатньою кількістю евакуаційних виходів. Крім цього, необхідно розробляти евакуаційні плани для працівників залежно 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 відділяється протипожежними перешкодами (стінами, зонами, перекриттями) для обмеження можливої площі пожежі і забезпечення умов для її ліквідації. Облаштування пожежних відсіків зумовлено великими розмірами сучасних виробничих і цивільних будівель, у яких зберігаються матеріальні цінності з горючих матеріалів, особливо на деревообробних підприємствах, що може призвести за їх відсутності до значних матеріальних збитків від пожежі. До того ж досі не розроблено методів визначення оптимальних розмірів площ пожежних відсіків, що в багатьох випадках гальмує проектування і будівництво різних виробничих будівель і споруд.

Питання, що стосуються визначення розмірів пожежних відсіків, розглянуто у 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 праць, зокрема А. Н. Баратова, В. П. Дьяконова, Ю. В. Кривцова та ін. Однак донині не визначено критеріїв для оцінки прийнятих розмірів пожежних відсіків. У деяких роботах, наприклад, Д. Г. Проніна [193, 194], обґрунтовуються розміри пожежних відсіків з використанням пожежних ризиків. Такий підхід досить суб'єктивний. Під час розгляду питань, пов'язаних з розмірами пожежних відсіків, також приділялася увага їх вогнестійкості. У цьому напрямі зробили значний внесок І. Ф. Астахова, І. С. Молчадський [15], С. В. Пузач [198], С. Л. Фомін [233] та ін.

Отже, наразі достатньою мірою ще не встановлено критеріїв для прийняття оптимального рішення щодо розподілу будівель і споруд на пожежні відсіки, що зумовлює потребу розробити метод оптимального нормування їхніх

розмірів, особливо для цехів деревообробних підприємств, які виготовляють вироби з горючих матеріалів.

Під час розгляду компоновального плану цеху деревообробного підприємства можна відзначити, що вся площа цеху розділена на окремі виробничі ділянки. Багато виробничих ділянок підвищеної пожежної небезпеки відокремлені від загальної площі цеху протипожежними захисними стінами, тобто ці ділянки вже розміщені у своєрідних пожежних відсіках. Тоді для розміщення пожежних відсіків залишається площа цеху, на якій розміщено виробниче обладнання та відповідні виробничі ділянки. В такому разі вивільнену площу цеху S для розміщення пожежних відсіків можна визначити за залежністю

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

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

Стоїть завдання визначити оптимальні розміри пожежних відсіків, які можна розмістити на виробничій площі цеху S . Для цього необхідно використовувати оптимізаційну математичну модель, що дозволяє визначити оптимальні розміри пожежних відсіків [44].

На першому етапі визначаємо кількість пожежних відсіків Π , які можна розмістити на виробничій площі S цеху

$$\Pi = \frac{S}{S_{\text{н.о}}}, \quad (2.16)$$

де $S_{\text{н.о}}$ – нормативне значення площі пожежного відсіку, м^2 [221].

Розрахункове значення Π округлити до цілого числа і приймаємо дійсне значення $\Pi_{\text{д}}$.

На другому етапі визначаємо дійсне значення площі $S_{\text{д.о}}$ кожного пожежного відсіку

$$S_{\partial.o} = \frac{S}{\Pi_{\partial}}. \quad (2.17)$$

На третьому етапі визначаємо площі $S_{y.i}$ виробничих ділянок і їх розміщення в пожежних відсіках, які знаходяться на вивільненій виробничій площі S цеху. При цьому пожежні відсіки за номерами розміщуємо згідно з виробничим процесом у цеху, тобто відсік O_1 розміщується на початку виробничого процесу, а відсіки O_{t-1} , O_t – наприкінці, t – загальна кількість номерів послідовно розміщених відсіків

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

де q – загальна кількість виробничих ділянок, які розміщуються на вивільненій виробничій площі S цеху; γ – коефіцієнт, який враховує проходи і проїзди на виробничих ділянках; $\gamma = 0,7 \dots 0,8$ [130].

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

Функція мети

$$S_{\partial.o.i} \Rightarrow \max; \quad (2.19)$$

за критерієм

$$|S_{n.o.i} - S_{\partial.o.i}| \Rightarrow \min; \quad (2.20)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq S_{n.o.i} \leq b_1; \quad (2.21)$$

$$a_2 \leq \Pi_{\partial.i} \leq b_2; \quad (2.22)$$

$$S_{\partial.o.i} \Pi_{\partial.i} \geq \gamma S; \quad (2.23)$$

$$S_{\partial.o.i} \Pi_{\partial.i} \leq S; \quad (2.24)$$

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

де a_1 – мінімальне значення нормативної площі пожежного відсіку, м^2 ; $a_1=0,9S_{н.о}$ [221]; $b_1 = 1,1S_{н.о}$ – максимальне значення нормативної площі пожежного відсіку, м^2 [221]; a_2 – значення $\Pi_{\partial,i}$, розраховане з використанням залежності (2.16) та заокруглене до цілого числа в меншу сторону; b_2 – значення $\Pi_{\partial,i}$, розраховане з використанням залежності (2.16) та заокруглене до цілого числа в більшу сторону; в разі отримання відповідно до залежності (2.16) цілого числа $\Pi_{\partial,i}$ необхідно для визначення a_2 від $\Pi_{\partial,i}$ відняти одиницю, а для визначення b_2 – додати одиницю; p – ймовірність потрапляння досліджуваної точки в область допустимих рішень; $p = k/N$, k – кількість точок (циклів роботи комп'ютера), які потрапили в область допустимих рішень, N – загальна кількість циклів роботи комп'ютера при вирішенні задачі; $[p]$ – допустиме значення ймовірності потрапляння досліджуваної точки в область допустимих рішень.

Для вирішення оптимізаційної моделі і визначення розмірів пожежних відсіків скористаємося методом Монте-Карло [59]. Область допустимих рішень, яка визначається обмеженнями (2.21)...(2.24), оточують m -мірним паралелепіпедом, в якому проводимо дослідження. Поставлену задачу найкраще розв'язувати з використанням ПЕОМ. За допомогою датчика комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел μ_i в інтервалі $0...1$. Для перетворення псевдовипадкових чисел μ_i , які рівномірно розподілені в інтервалі $0...1$, до значень $S_{н.о,i}$ та $\Pi_{\partial,i}$ використовуємо залежності

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

$$\Pi_{\partial,i} = a_2 + \mu_{2i}(b_2 - a_2). \quad (2.27)$$

Блок-схему алгоритму розв'язку оптимізаційної математичної моделі визначення оптимальних розмірів пожежних відсіків зображено на рис. 2.11.

Після введення вихідних даних у блоці 1 виконують занулювання циклів роботи системи в блоці 2 і генерування псевдовипадкових чисел у блоці 3. Отримані псевдовипадкові числа перетворюються у блоці 4 до значень $S_{н.о,i}$ та $\Pi_{\partial,i}$ за залежностями (2.26) і (2.27). Крім того, значення кількості пожежних

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

У блоці 5 виконується присвоєння кожного наступного циклу розв'язку задачі. У 6 і 7 блоках здійснюється перевірка обмежень (2.23) і (2.24). У разі невиконання умов (2.23) і (2.24) цикл розв'язку задачі переривається і починається розв'язок 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 розв'язанні задачі. У разі, якщо виконується тільки перший цикл, розв'язок задачі переривається в блоці 9 і починається розв'язування 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 критерію з попереднім. У разі невиконання умови, розв'язок задачі переривається в блоці 10 і починається розв'язування з блоку 3. У блоці 11 виконується присвоєння кожного наступного циклу k_i продовження виконання завдання. У 12 блоці визначається значення ймовірності потрапляння точки в область допустимих рішень. Перевірка умови, що певне значення ймовірності p_i більше або дорівнює значенню, виконується в блоці 13. Якщо умова не виконується, то розв'язування задачі починається з блоку 3. Блок 14 здійснює роздрук результатів розрахунку.

Для реалізації оптимізаційної моделі визначення оптимальних розмірів пожежних відсіків для цехів деревообробних підприємств було розроблено для ПЕОМ пакет прикладних програм на мові C[#] для роботи в середовищі Windows XP [116, 119]. Оптимізація визначення розмірів пожежних відсіків виконується за послідовністю, 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).

Лістинги пакета прикладних програм для визначення оптимальних розмірів і кількості пожежних відсіків наведено в додатку А1. Роботу пакета прикладних програм продемонструємо на прикладі.

Приклад. Визначити кількість та 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 - $S_{ц} = 14\,256 \text{ м}^2$; 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 С0). $\gamma = 0,7$; $[p] = 0,5$; $a_1 = 0,9S_{н.о} = 3150 \text{ м}^2$; $b_1 = 1,1S_{н.о} = 3850 \text{ м}^2$; $a_2 = 2$; $b_2 = 3$; $S = 14256 - 5184 = 9082 \text{ м}^2$.

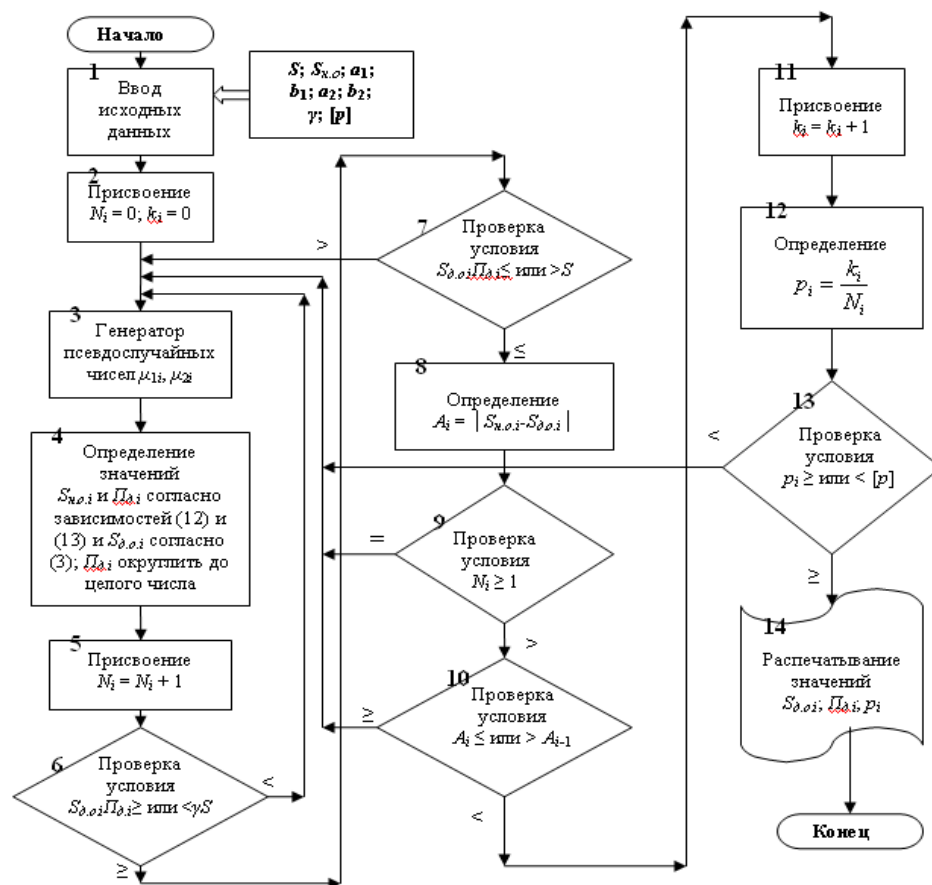


Рис. 2.11. Блок-схема алгоритму визначення оптимальних розмірів і кількості пожежних відсіків

Після введення вхідних даних отримали результат (рис. 2.12): $S_{d.o} = 3\,027,33 \text{ м}^2$; кількість пожежних відсіків $P_d = 3$; $p_i = 0,5$.

Наявність пожежних відсіків у 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, вогнестійкість яких дорівнює REI60. Кожна ділянка має вільний вихід на центральний проїзд цеху. Розглянемо випадок, коли на одній ділянці виникла кутова пожежа (90° ; $\alpha = 0,785$) пожежної ситуації 2(0; B) (рис. 2.13).

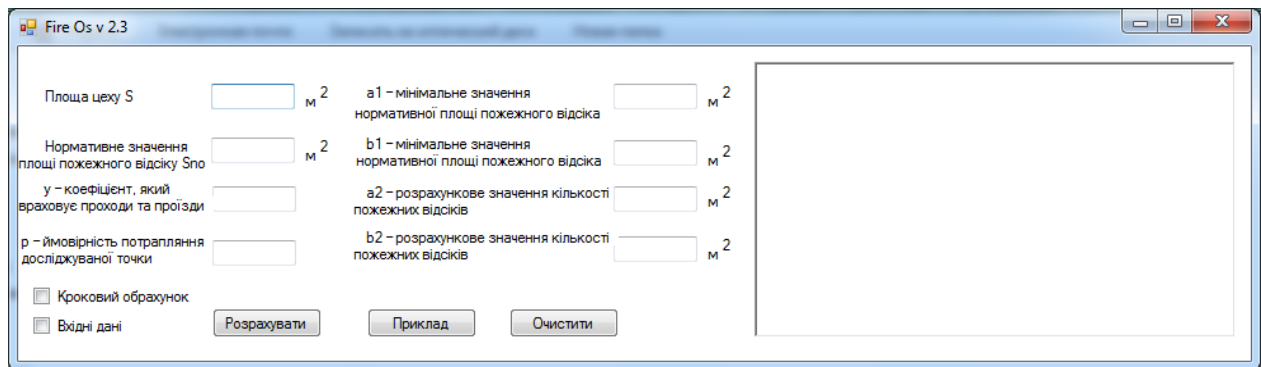


Рис. 2.12. Загальний вигляд робочого вікна програми для визначення кількості і оптимальних розмірів пожежних відсіків

Загальна площа цієї ділянки (ширина 30 м; довжина до центрального проїзду 34 м) становить 1020 м^2 , лінійна швидкість розповсюдження полум'я $V_l = 0,022 \text{ м/с}$ [135], тривалість вільного розвитку пожежі $\tau_{6,z} = 35,9 \text{ хв}$.

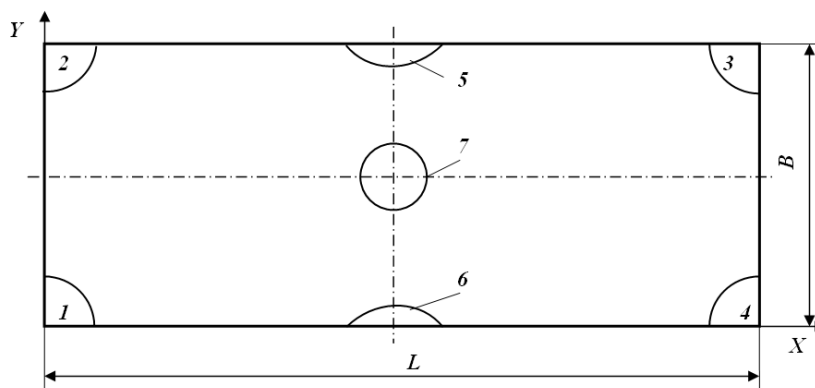


Рис. 2.13 – Схема приміщення цеху деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями і формами площі пожежі: 1, 2, 3, 4 – кутова форма (90°); 5, 6 – кутова форма (180°); 7 – кругова

Якщо 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 дорівнюватиме $P_{2\psi} = 1$. Імовірність поширення пожежі по центральному проїзду за відсутності її локалізації і гасіння також дорівнюватиме $P_{\psi} = 1$. Далі пожежа може перейти з центрального проїзду на сусідню ділянку і ділянку протилежно розміщену (позначимо їх відповідно цифрами 5 і 1) з імовірностями $P_{5\psi} = 1$ і $P_{2\psi} = 1$. Але в разі 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 – через протипожежну перегородку, яка має вогнестійкість REI60. Для визначення імовірності можливого переходу пожежі з ділянки 2 на ділянку 5 через протипожежну перегородку скористаємося основними положеннями теорії надійності [67].

Маємо, наприклад, за $\tau_{6,2} = 35,9$ хв, згідно з експоненціальним законом розподілу [67], імовірність P_{25} переходу пожежі з ділянки 2 до ділянки 5 через протипожежну перегородку визначаємо за залежністю [104]

$$P_{25} = 1 - \exp(-\lambda \tau_{6,2}), \quad (2.28)$$

де λ – інтенсивність відмов, хв^{-1} ;

$$\lambda = \frac{1}{T_B}; \quad (2.29)$$

T_B – тривалість вогнестійкості, хв

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

$$P_{25} = 1 - e^{-\frac{\tau_{6,2}}{T_B}} = 1 - 2,718^{-\frac{35,9}{60}} = 0,45.$$

Визначимо сумарну імовірність P_{Σ} поширення пожежі між ділянками цеху з використанням протипожежних перегородок і без них за залежністю

$$P_{\Sigma} = P_{2ц} P_{ц} P_{1ц} P_{5ц} (1 - P_{25}) = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 (1 - 0,45) = 0,55.$$

У цьому випадку використання протипожежних перегородок зменшує швидкість розповсюдження пожежі по приміщенню цеху приблизно у

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

Результати розгляду визначення кількості й оптимізації розмірів пожежних відсіків та їх вплив на швидкість поширення пожежі показали:

- кількість пожежних відсіків та їх оптимальна площа залежать від площі цеху, на якій розміщено обладнання й устаткування, що не захищено від вільного розповсюдження пожежі;
- точність визначення оптимальної площі пожежі залежить від прийнятої імовірності потрапляння досліджуваних точок в область допустимих розв'язків оптимізаційної задачі;
- наявність у цеху пожежних відсіків зменшує швидкість поширення пожежі в 1,8 разу.

Висновки

1. Прийнята й удосконалена для дослідження пожежних ситуацій в деревообробному цеху система FDS дає змогу визначати критичний час пожежі, швидкість її поширення, температурні поля та виділення диму і токсичних речовин.

2. Найбільша швидкість розповсюдження пожежі, як показали результати досліджень, простежується в разі виникнення кругової пожежі в центральній частині цеху. Це пояснюється тим, що довжина шляху її розповсюдження скорочується удвічі.

3. Результати досліджень тривалості поширення пожежі в закритому приміщенні деревообробного цеху загальною площею 14 256 м² у різних пожежних ситуаціях показали, що залежно від місця виникнення пожежі вся площа цеху може бути охоплена пожежею в межах 15...33,4 хв. У межах цього часу пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС не можуть ліквідувати пожежу. Тому рекомендується на деревообробних підприємствах організовувати добровільні пожежно-рятувальні служби, які зможуть у разі виникнення пожежі розпочати її ліквідацію ще до приїзду пожежників.

4. Розроблено оптимізаційну математичну модель і пакет прикладних програм для визначення кількості і площі пожежних відсіків у закритих приміщеннях деревообробних цехів, які дозволяють розраховувати оптимальну площу пожежного відсіку та їх кількість.

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

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

Пожежі на відкритих складах лісоматеріалів, як ми раніше вже зазначали, є найбільш небезпечними. Адже для них характерне розкидання іскор на великі відстані, що залежить, зокрема, від швидкості вітру та висоти їх підйому конвективною колонкою [68]. Цей вид пожеж і способи їх гасіння вивчали в 1950–1960-х роках в Росії, спираючись на результати експериментальних досліджень на натурних об'єктах. Узагальнення цих результатів було опубліковане в роботах [139, 140]. Окрему увагу приділяли швидкості поширення вогню під час пожежі на складах круглого лісу. Відтак середньою швидкістю поширення вогню називали 0,23...0,36 м/хв. А вже на початку 1980-х років, як було згадано, російські науковці розробляли методи математичного моделювання розвитку пожеж на відкритих складах лісоматеріалів. Дослідники вважали, що на поширення пожежі впливали теплова радіація, конвекція, а також перенесення іскор і головешок вітром [133].

Аналіз робіт із визначення швидкості поширення фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів штабельного зберігання підтверджує, що досі немає вдосконаленої методології її визначення. Тому актуальним є завдання, вирішення якого деякою мірою дасть змогу ліквідувати цей недолік, а отримані результати уможливлять розробку додаткових заходів протипожежної безпеки на цих складах.

За основу під час розгляду конструктивних особливостей відкритих складів лісоматеріалів візьмемо рекомендації [220]. Відтак на їх підставі розглянемо план розташування штабелів одного кварталу складу пиломатеріалів (рис. 3.1).

Основні параметри кварталу складу круглих лісоматеріалів: штабелі згідно з рекомендаціями [67] розміром $b \times l \times h = 6 \times 6,5 \times 6$ м; ширина поздовжніх розривів між штабелями $b_{нов} = 16$ м; ширина поперечних розривів між штабелями $b_{нон} = 6$ м; загальна кількість поздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною 219 м; загальна площа кварталу $20\,586 \text{ м}^2 \approx 2$ 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 залежно від пожежних ситуацій на відкритих складах пиломатеріалів скористаємося методологією та результатами, які наведено у працях [74, 91, 106, 108, 134]. На підставі даних робіт швидкість поширення фронту полум'я V_{II} по одному штабелю

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

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

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

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

$$K = 2zK_\rho; \quad (3.3)$$

z – кількість рядів пиломатеріалу на висоті 1 м; h – висота штабеля, м; V_e – швидкість вітру, м/с; L_ϕ – довжина фронту полум'я, м.

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

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

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

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

де $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – стала Стефана-Больцмана; T_ϕ – температура факела, К; T_∂ – температура займання деревини, К (згідно з 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]; $A_\partial = 0,6$ – 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 штабеля, який розміщений поряд з тим, що горить

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

де S_e – площа випромінювання теплового потоку, м²; $\alpha_{ш}$ – коефіцієнт тепловіддачі для бічної площини штабеля, кВт/(м²К); $S_{ш}$ – площа бокової

площини штабеля в поперечних або поздовжніх розривах між штабелями, м^2 ; T_0 – початкова температура на боковій площині штабеля, К.

Після визначення $T_{ш}$, його значення порівнюють з температурою займання деревини T_0 . Якщо $T_{ш} \geq T_0$ сусіднього штабеля, то пожежа переходить на цей штабель.

Поставлену проблему розв'язуватимемо у два етапи: 1) визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі V_{ϕ} на відкритих складах пиломатеріалів на основі побудови графових моделей; 2) визначення впливу швидкості вітру V_v на швидкість розповсюдження фронту пожежі V_{ϕ} на відкритих складах пиломатеріалів. Проілюструємо це конкретним прикладом.

Приклад. Визначити швидкість розповсюдження фронту пожежі V_{ϕ} на складі пиломатеріалів (рис. 3.1). У штабелях зберігаються бруски сосни густиною $\gamma_0 = 540 \text{ кг/м}^3$, вологістю 8-9% з температурою займання $T_0 = 528 \text{ К}$. Кількість брусків на 1 м висоти штабеля $z = 10$ з густиною укладки пиломатеріалів $K_p = 0,6$. Основні параметри одного кварталу складу: штабелі розміром $b \times l \times h = 6 \times 6 \times 5 \text{ м}$; ширина поздовжніх розривів між штабелями $b_{нов} = 16 \text{ м}$; ширина поперечних розривів між штабелями $b_{нон} = 5 \text{ м}$; загальна кількість поздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною 193 м; загальна площа кварталу $18 \cdot 142 \text{ м}^2 \approx 1,8 \text{ га}$; протипожежні розриви між кварталами при висоті штабелів 5 м дорівнюють 40 м. Можлива імовірність виникнення пожеж: 1) у центрі першого поперечного ряду кварталу на штабелі № 1.3; 2) у зовнішньому куті кварталу в першому поперечному ряду на штабелі № 1.5; 3) посередині поздовжнього крайнього правого ряду на штабелі № 9.5; 4) у центрі кварталу на штабелі № 9.3. Швидкість вітру $V_v = 4 \text{ м/с}$, температура навколишнього середовища $t = 293 \text{ К}$, а поверхонь штабеля $T_0 = 300 \text{ К}$. За даними робіт [135, 198, 133], $Q_{\min} = 13800 \text{ кДж/кг}$; $\psi_n = 0,0145 \text{ кг/м}^2\text{с}$; $c_p = 1,7 \text{ кДж/кгК}$; $A_{\phi} = 0,9$; $A_d = 0,6$. 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'єму штабеля за залежністю (3.3)

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

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_{ϕ} факела.

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

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

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

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

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

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

6. Кут нахилу α_k конвективної колонки відносно вертикальної осі

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

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

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

За аналогією для поздовжнього ряду визначаємо густину 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 поздовжніх і поперечних рядів штабелів. При цьому в нашому прикладі $b = l$ для всіх штабелів, то площу поверхні, яка випромінює тепловий потік на поперечні і поздовжні ряди сусідніх штабелів, можна визначати так:

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

Тоді

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

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

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

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

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

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

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

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 становить 100 с або 1,67 хв. Після цього часу теплове випромінювання діє на штабелі № 1.2 і № 1.4 першого ряду та на штабелі № 2.3 другого ряду. Температура, яка діє на бокові поверхні штабелів № 1.2 і № 1.4 першого ряду дорівнює $T_{ш.нон} = 1078 \text{ К}$, а на штабелі № 2.3 другого ряду – $T_{ш.нов} = 1175 \text{ К}$, що значно перевищує температуру займання деревини штабеля, яка дорівнює $T_0 = 528 \text{ К}$. Але займання сусідніх штабелів відбуватиметься дещо із затримкою. Згідно з даними роботи [50] час затримки спалаху враховують коефіцієнтом $k = 0,4 \dots 0,6$. У нашому прикладі при $k = 0,4$ час займання τ_z сусідніх штабелів після охоплення полум'ям штабеля № 1.3 буде через час, який дорівнює

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

На підставі цих даних можна стверджувати, що від початку пожежі за час $\tau_{II} = \tau_{ш} + \tau_z = 1,67 + 2,5 = 4,17 \text{ хв}$ площа пожежі на складі пиломатеріалів буде $S_{II} = 36 \text{ м}^2$, а через час $2\tau_{II} = 8,34 \text{ хв}$ – $S_{II2} = 144 \text{ м}^2$ (горять штабелі № 1.2, 1.3, 1.4 першого ряду і № 2.3 другого ряду). Відповідно час $3\tau_{II} = 12,51 \text{ хв}$ – $S_{II3} = 288 \text{ м}^2$ (горять усі п'ять штабелів першого ряду і штабелі № 2.2, 2.3, 2.4 другого ряду). Протягом часу $4\tau_{II} = 16,68 \text{ хв}$ – $S_{II4} = 468 \text{ м}^2$ (горять усі п'ять штабелів першого і другого рядів та штабелі № 3.2, 3.3, 3.4 третього ряду) і т. д. За умовами розглядуваного прикладу вплив часу вільного горіння на площу

пожежі можна представити каскадним графом розповсюдження пожежі (рис. 3.3).

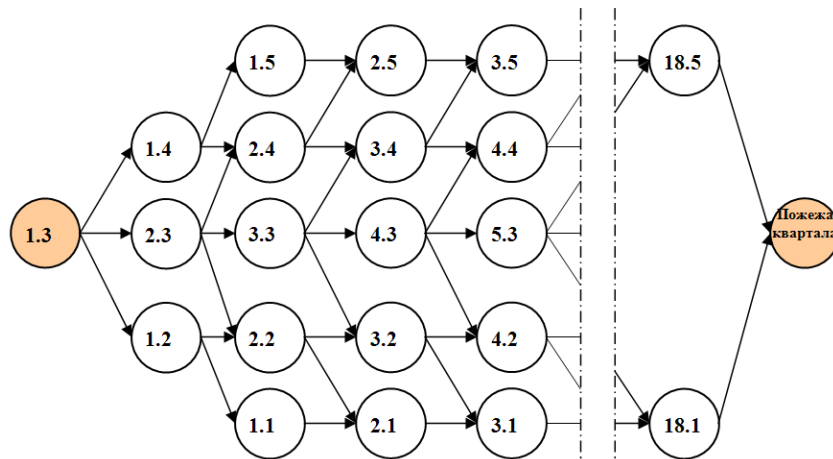


Рис. 3.3. Каскадний граф розповсюдження пожежі на кварталі складу пиломатеріалів при швидкості вітру $V_B = 4$ м/с

Вершини графа (рис. 3.3) зображають штабелі пиломатеріалів, а ребра – час τ_{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 графа розповсюдження пожежі показують, що на ньому можна виділити $k_{ш} = 20$ груп штабелів, кожна з яких одночасно поширює пожежу вздовж кварталу складу, а саме: 1) пожежа виникла на штабелі 1.3 (перша група); 2) від штабеля 1.3 пожежа передається на штабелі 1.2, 2.3 і 1.4 (друга група); 3) від штабелів 1.2, 2.3 і 1.4 – на штабелі 1.1, 2.2, 3.3, 2.4 і 1.5 (третя 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 поширення фронту пожежі по кварталі складу пиломатеріалів за залежністю

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

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

На підставі розгляду каскадного графа розповсюдження пожежі на кварталі складу пиломатеріалів (рис. 3.3) та з використанням залежності (3.8) були виконані розрахунки для прикладу, який розглядаємо, швидкості розповсюдження фронту пожежі за умови імовірності виникнення пожежі в першому поперечному ряду кварталу на штабелі № 1.3. Результати розрахунків зображено 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. Упродовж 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: у зовнішньому куті кварталу першого поперечного ряду на штабелі № 1.5; посередині поздовжнього крайнього правого ряду на штабелі № 9.5; у центрі кварталу на штабелі № 9.3. Для наведених 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.

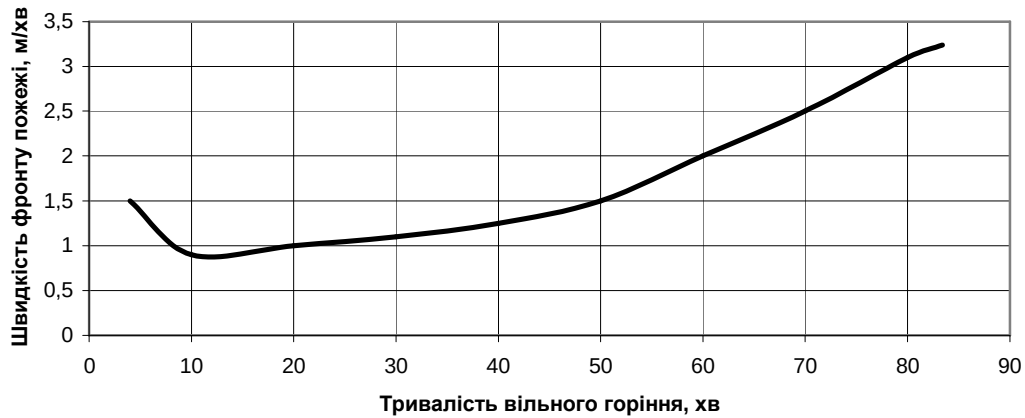


Рис. 3.4. Залежність швидкості фронту розповсюдження пожежі від тривалості вільного горіння (пожежа розпочалася на штабелі 1.3 при швидкості вітру $V_v = 4$ м/с)

Отримані результати дають змогу зробити висновки про те, що місце виникнення пожежі на складі пиломатеріалів істотно впливає на швидкість розповсюдження фронту пожежі та на тривалість вільного горіння. Наприклад, найбільша тривалість вільного горіння простежується при виникненні пожежі на зовнішньому куті, а найменша – у центрі кварталу (приблизно удвічі). Зростання кінцевої швидкості розповсюдження фронту пожежі пояснюється тим, що кінцеве покриття пожежею складу відбувається на меншій кількості штабелів. Наприклад, якщо пожежа виникає на зовнішньому куті, то закінчується на одному штабелі, а якщо в центрі кварталу, то закінчується на п'яти штабелях.

Другий етап. Для визначення впливу швидкості вітру V_v на швидкість розповсюдження фронту пожежі V_ϕ на відкритих складах пиломатеріалів скористаємося залежностями (3.1), (3.4), (3.7) та значенням часу τ_{II} . Розглянемо вплив швидкості вітру в межах $V_v = 1 \dots 20$ м/с на швидкість розповсюдження фронту пожежі V_ϕ . Для цього застосуємо залежність

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

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

Результати розрахунків наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Значення коефіцієнта K_g

Швидкість вітру, м/с	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Значення K_v	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_g рекомендується для інтерполяції значень використовувати залежність

$$K_g = 0,2365V_g + 0,1082. \quad (3.10)$$

Результати аналізу отриманих даних показують, що зі збільшенням швидкості вітру, наприклад, у два рази швидкість розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів зростає майже удвічі.

Результати виконаних досліджень дозволили отримати такі результати:

- розроблено з використанням графових моделей методологію визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів, яка дає змогу залежно від виду пиломатеріалів і місця виникнення пожежі визначати час поширення пожежі по кварталу складу пиломатеріалів та швидкість фронту пожежі;
- швидкість розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів зростає при наближенні її в кінець кварталу складу, що пояснюється охопленням наприкінці пожежі меншої кількості штабелів;
- встановлено, що найбільша тривалість вільного розповсюдження пожежі є в разі її виникнення на зовнішньому куті, а найменша – у центрі кварталу. Різниця в цьому випадку доходить до двох 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 істотно впливає на швидкість розповсюдження фронту пожежі. Зі збільшенням швидкості вітру, наприклад, у два рази швидкість розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів зростає майже удвічі.

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 беремо значення швидкості поширення полум'я по штабелю при пожежі, отримане на підставі результатів експериментальних досліджень у ВНДІПО (Росія) [135]. Згідно з цими результатами швидкість поширення полум'я по штабелю круглих лісоматеріалів $V_{\Pi} = 0,0585$ м/с при швидкості вітру $V_{\epsilon} = 0$ м/с і з вологістю деревини 11...12%. Штабелі укомплектовані хвойними породами круглих лісоматеріалів довжиною 6,5 м і діаметром 18...20 см [146, 248].

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

$$V_{\Pi\epsilon} = V_{\Pi} K_{\epsilon} K_{\alpha}, \quad (3.11)$$

де K_{ϵ} – коефіцієнт, який враховує вплив швидкості вітру на швидкість поширення полум'я по штабелю

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

$V_{\text{в}}$ – швидкість вітру, м/с; K_{α} – коефіцієнт, який враховує вплив напрямку дії вектора швидкості вітру на швидкість поширення полум'я по штабелю

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

$\alpha_{\text{в}}$ – кут напрямку вітру (при $\alpha_{\text{в}} = 90^{\circ}$ розглядається попутній напрям вітру, який збігається з поздовжнім розміщенням штабелів кварталу (рис. 3.2); при $\alpha_{\text{в}} = 270^{\circ}$ – зустрічний напрям вітру), град.

Для визначення часу $\tau_{\text{ш}}$ охоплення полум'ям одного штабеля використаємо залежність для визначення площі пожежі за перші 10 хв з моменту її виникнення. У цьому випадку маємо [122]

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

де $S_{\text{Пш}}$ – площа штабеля, яка охоплюється полум'ям пожежі, м²;

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

α – 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 штабеля необхідно визначити густину потоку q_p результуючого випромінювання від штабеля, який горить. У цьому випадку застосуємо залежність (3.5).

Температуру факела $T_{\text{ф}}$ (К) штабеля, що горить, визначаємо з використанням залежності [52]

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

де Q_{min} – значення найнижчої робочої теплоти згоряння горючого навантаження, кДж/кг; ψ_n – питома швидкість вигорання, кг/м²с; c_p – питома теплоємність

штабеля, для якого розглядається пожежа, кДж/кг·К; G – пожежне навантаження становить 0,3 маси одного шару штабеля на відкриті для полум'я поверхні штабеля, кг/м²

$$G = 0,075\pi d\gamma_{\partial}; \quad (3.17)$$

d – діаметр круглого лісоматеріалу, м; γ_{∂} – густина круглого лісоматеріалу, кг/м³ (густина при вологості 12%: сосна – $\gamma_{\partial} = 520$ кг/м³; ялина – $\gamma_{\partial} = 450$ кг/м³; дуб – $\gamma_{\partial} = 810$ кг/м³).

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

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

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

Кут нахилу α_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_{ϕ} і навколишнього середовища T_0 . У цьому випадку густину теплового потоку можна визначити за залежністю

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

де α – коефіцієнт тепловіддачі при горінні штабеля від його верхньої площини, Вт/м² ($\alpha = 5$ Вт/м² [82]).

Підйомна сила F (Н) конвективної колонки буде

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

де τ_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 менша від підйомної сили конвективної колонки ($F \gg F_2$). У цьому випадку палаючі головешки піднімуться на висоту $h + H$, а потік вітру віднесе їх на відстань L (м)

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

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.

Далі потрібно визначити площі випромінювання від штабеля, який горить, до сусіднього. За площу випромінювання беремо 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 $S_{e,non}$ (м²) для поперечних розривів

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

площа випромінювання $S_{e,nov}$ (м²) для поздовжніх розривів

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

Для спрощення позначень надалі площі випромінювання теплових потоків позначатимемо S_e .

Визначаємо тепловий потік Q (Вт) випромінювання

$$Q = q_p S_s. \quad (3.25)$$

Визначаємо значення температури $T_{ш}$ (К) на бічній поверхні штабеля, розміщеного поряд зі штабелем, який горить

$$T_{ш} = \frac{Q}{\alpha_{ш} S_{ш}} + T_0, \quad (3.26)$$

де $\alpha_{ш}$ – коефіцієнт тепловіддачі бічної площини штабеля, кВт/(м²К); $S_{ш}$ – площа бічної поверхні штабеля в поперечних або поздовжніх розривах між штабелями, м².

Усереднене значення коефіцієнта тепловіддачі [135]

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

де K_ρ – густина укладки круглого лісоматеріалу у штабелі

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

V_δ – об'єм круглого лісоматеріалу у штабелі, м³; $V_{ш}$ – об'єм штабеля пиломатеріалів ($b \cdot l \cdot h$), м³; при розрахунках беруть середнє значення $K_\rho = 0,785$.

Визначивши $T_{ш}$, його значення порівнюють з температурою займання деревини T_δ . Якщо $T_{ш} \geq T_\delta$ для сусіднього штабеля, то відбувається займання цього штабеля, але при цьому, згідно з даними роботи [50], потрібно враховувати час затримки займання коефіцієнтом $k = 0,4 \dots 0,6$. Отже, загорання сусіднього штабеля в цьому випадку відбудеться за час τ_3

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

Тоді час загоряння штабелів τ_i , які розміщені поряд з палаючим, за умови, що за час τ_{ui} буде виконуватися умова $T_{ui} \geq T_{\partial}$, можна визначити за залежністю

$$\tau_i = \tau_{ui} + \tau_z = \frac{\tau_{ui}}{k}, \quad (3.30)$$

Поставлену проблему вирішуватимемо у два етапи: 1) визначення швидкості поширення фронту пожежі V_{ϕ} на відкритих складах круглих лісоматеріалів на основі побудови графової моделі; 2) визначення впливу швидкості і напрямку вітру V_v на швидкість поширення фронту пожежі V_{ϕ} на відкритих складах круглих лісоматеріалів. Проілюструємо це на прикладі.

Приклад. Визначити швидкість поширення фронту пожежі V_{ϕ} на складі круглих лісоматеріалів, розміри якого зображено на рис. 3.2. У штабелях зберігається круглий лісоматеріал сосни густиною $\gamma_d = 520 \text{ кг/м}^3$, вологістю 11...12% і з температурою займання $T_d = 528 \text{ К}$. Пожежа виникла на штабелі 1.3 першого поперечного ряду. Розглянути V_{ϕ} при $V_v = 0$ на всю площу кварталу, а також V_{ϕ} при $V_v = 10 \text{ м/с}$, враховуючи $\alpha_v = 45^\circ, 90^\circ$ і 270° в процесі вільного горіння до початку локалізації пожежі в межах 25 хв. Згідно з даними [135] $Q_{\min} = 13800 \text{ кДж/кг}$; $\psi_{\Pi} = 0,0145 \text{ кг/м}^2\text{с}$; $c_p = 1,7 \text{ кДж/кгК}$. Температура довкілля $T_0 = 293 \text{ К}$. Швидкість поширення полум'я по штабелю $V_{\Pi} = 0,0585 \text{ м/с}$ при швидкості вітру $V_v = 0$ і вологості деревини 11...12%.

Розв'язок. Визначення швидкості поширення фронту пожежі V_{ϕ} на відкритих складах круглих лісоматеріалів на основі побудови графової моделі.

1. Визначаємо площу штабеля, яка охоплюється полум'ям пожежі, використовуючи залежність (3.15)

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

2. Визначаємо τ_{ui} за залежністю (3.14)

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

3. Визначаємо температуру факела за залежностями (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 ($x = 3,25$ м) при $V_e = 0$. У цьому випадку в емпіричну залежність необхідно замість значення V_e підставити цифру 4 [133, 134]

$$H = 1,323 \sqrt{3,25^2 \left(\frac{1,4 \cdot 13800 \cdot 0,0145 \cdot 6 \cdot 6,5}{293 \cdot 4^3} \right)^5} = 1,18 \text{ м;}$$

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

5. Визначаємо площу випромінювання для поперечних і поздовжніх розривів за залежностями (3.23) і (3.24)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

9. Визначаємо температуру на бічних поверхнях сусідніх штабелів уздовж поздовжніх $T_{ш.пов}$ і поперечних $T_{ш.пон}$ рядів за залежністю (3.26)

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

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 становить 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 $T_{ш.пон} = 1047 \text{ К}$, а на штабель № 2.3 другого ряду – $T_{ш.пов} = 1225 \text{ К}$, що значно перевищує температуру займання деревини штабеля, яка дорівнює $T_0 = 528 \text{ К}$. Однак загоряння сусідніх штабелів від штабеля № 1.3 відбуватиметься дещо із 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 горітиме 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).

Вершини графа зображують штабелі лісоматеріалів, а ребра – час τ_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.

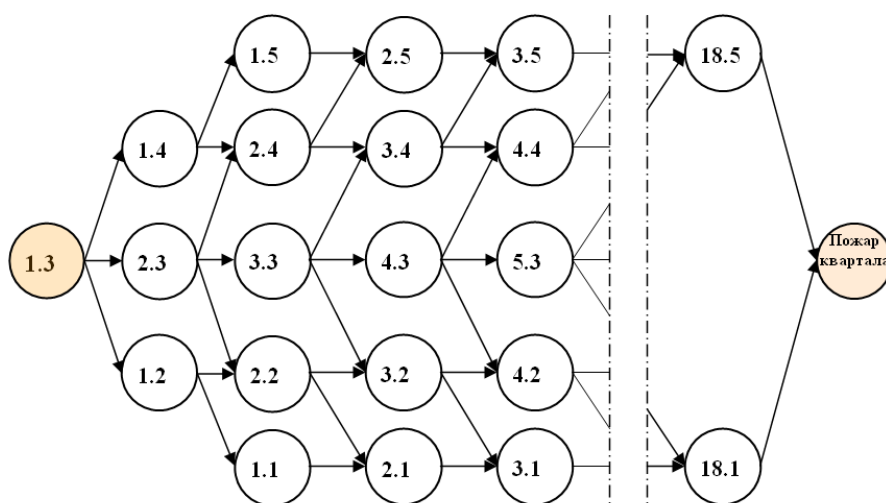


Рис. 3.5. Каскадний граф поширення пожежі на складі круглих лісоматеріалів при $V_g = 0$

Результати аналізу каскадного графа показують, що на ньому можна виділити $k_{ш} = 20$ груп штабелів, кожна з яких одночасно поширює пожежу уздовж кварталу складу. Використовуючи результати аналізу каскадного графа, можна визначити швидкість поширення фронту пожежі V_{ϕ} (м/хв) для лісоскладу залежно від місця його виникнення (на торці кварталу або уздовж його бокової сторони, а також безпосередньо на території складу поблизу цих сторін):

- у поздовжньому напрямку

$$V_{\phi.нов} = \frac{S_{ш} n_{ш}}{b n_{ш.нов} \tau_i}; \quad (3.31)$$

- у поперечному напрямку

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

де $S_{ш}$ – площа штабеля в плані, м²; $n_{ш}$ – загальна кількість штабелів, які охоплені полум'ям пожежі, шт.; τ_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) було розраховано швидкості поширення фронту пожежі в поздовжньому напрямку для розглядуваного прикладу, 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 зауважити, 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 штабелі (рис. 3.5), а далі на п'ять. При цьому швидкість фронту поширення 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 у поздовжніх рядах, зменшується і швидкість фронту пожежі зменшується до $V_{ф.нов} = 0,9$ м/хв.

Для визначення впливу швидкості вітру V_e на швидкість поширення фронту пожежі $V_{ф}$ на відкритих складах круглих лісоматеріалів використовуємо залежності (3.11), (3.14), (3.16), (3.18), (3.20) – (3.22), (3.26), (3.31) і значенням часу τ_i . Розглянемо згідно з умовою прикладу вплив $V_e = 10$ м/с на $V_{ф}$, враховуючи $\alpha_e = 45$ °С, 90 °С і 270 °С в процесі вільного горіння в межах 25 хв до початку локалізації пожежі.

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

$$K_e = 0,9912 \exp(0,0388 \cdot 10) = 1,46;$$

$$K_{\alpha=45} = -5 \cdot 10^{-5} \cdot 45^2 + 0,0123 \cdot 45 + 0,374 = 0,83;$$

$$K_{\alpha=90} = 1,08; \quad K_{\alpha=270} = 0,05; \quad V_{\Pi 61} = 0,0585 \cdot 1,46 \cdot 0,83 = 0,071 \text{ м/с};$$

$$V_{\Pi 62} = 0,092 \text{ м/с}; \quad V_{\Pi 63} = 0,0043 \text{ м/с}.$$

2. Визначаємо τ_{ui} за залежністю (3.14)

$$\tau_{ui1} = 2\sqrt{\frac{189}{3,14 \cdot 0,071^2}} = 219 \text{ с}; \quad \tau_{ui2} = 169 \text{ с}; \quad \tau_{ui3} = 1804 \text{ с}.$$

3. Температура факела $T_{\phi 1} = 1062 \text{ К}; T_{\phi 2} = 811 \text{ К}; T_{\phi 3} = 1273 \text{ К}.$

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

5. При певних значеннях τ_{ui} охоплення полум'ям одного штабеля температура T_{ui} на бічних поверхнях сусідніх штабелів буде:

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

$$T_{ui.нов3} = 1047 \text{ К}.$$

Аналізуючи отримані значення температур, можна зробити висновок, що займання сусідніх штабелів у разі дії на склад лісоматеріалів попутного вітру за час $\tau_{ui2} = 169 \text{ з}$ не станеться. У цьому випадку буде затримка в займанні сусідніх штабелів до $\tau_{ui2} = 210 \text{ с}$, тобто тільки за цей час температура факела досягне $T_{\phi 2} = 1008 \text{ К}$, а $T_{ui.нов2} = 692 \text{ К}; T_{ui.нов2} = 613 \text{ К}.$

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

У цьому випадку зміна швидкості фронту пожежі на складі круглого лісоматеріалу при $V_{\epsilon} = 10 \text{ м/с}$ в порівнянні з безвітряною погодою буде: 1) при бічному вітрі $\alpha_{\epsilon} = 45^{\circ} \rightarrow V_{\phi}$ збільшується на 21,4%; 2) при попутному вітрі $\alpha_{\epsilon} =$

$90^\circ \rightarrow V_\phi$ збільшується на 26,6%; 3) при зустрічному вітрі $\alpha_\phi = 270^\circ \rightarrow V_\phi$ зменшується приблизно у 3,5 разу.

Отож можна стверджувати, що за відсутності вітру до початку локалізації пожежі після 25 хв вільного горіння полум'ям буде охоплено 11 штабелів загальною площею 429 м². За вітряної погоди при $V_\phi = 10$ м/с за час вільного горіння полум'ям буде охоплено: 1) при бічному вітрі $\alpha_\phi = 45^\circ \rightarrow 15$ штабелів загальною площею 585 м²; 2) при попутному вітрі $\alpha_\phi = 90^\circ \rightarrow 17$ штабелів загальною площею 663 м²; 3) при зустрічному вітрі $\alpha_\phi = 270^\circ \rightarrow 3$ штабелі загальною площею 117 м².

Результати виконаних досліджень дозволили зробити такі висновки:

- розроблено методологію прогнозування розвитку пожежі і швидкості поширення її фронту на відкритих складах круглих лісоматеріалів з використанням графової моделі, яка дозволяє виділяти групи охоплених полум'ям штабелів та 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 в разі безвітряної погоди і за наявності зустрічного вітру фронту пожежі;
- збільшення швидкості фронту пожежі за наявності вітру посилюється за рахунок розкидання палаючих 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

Останнім часом під час розгляду процесу поширення пожежі по території складу пиломатеріалів використовують математичні моделі, які враховують

теплове випромінювання, від якого нагрівається поверхня деревини сусіднього штабеля від факела полум'я штабеля, що горить. Крім цього, важливо 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].

У наукових працях не розглянуто питання екологічної безпеки і не пов'язано пожежний ризик з екологічним. Також дослідники не розглядають нормативних даних екологічного ризику. Відповідно це є актуальним завданням сьогодення. Для його вирішення потрібно на основі результатів теоретичних й експериментальних досліджень розробити метод встановлення залежності екологічного ризику від пожежного на відкритих складах лісоматеріалів та його зменшення завдяки впровадженню оптимальних проектів системи пожежогасіння [38].

Екологічний ризик техногенного характеру на об'єкті залежить передусім безпосередньо від ризику виникнення надзвичайної ситуації. Наприклад, на об'єкті існує ризик виникнення пожежі, яка відповідно призведе до виникнення локального екологічного забруднення в обсязі, який деякою мірою буде пропорційний площі виникнення пожежі.

Розглянемо згідно з рекомендаціями [220] конструктивні особливості складу лісоматеріалів. Площа складу лісоматеріалу відкритого зберігання повинна бути не більше як 4,5 га і повинна поділятися на квартали. Ширина кварталу не повинна перевищувати 100 м. Групи штабелів необхідно відокремлювати між собою поздовжніми та поперечними розривами. Ширина поздовжніх розривів $b_{нов}$ має бути не менше як $1,5h$ (де h – висота штабеля), а поперечних – не менше як $b_{non} = h$. По поздовжнім розривам передбачають тверде покриття шириною щонайменше 3 м для проїзду пожежних машин. Відстань від штабелів лісоматеріалів до середини вказаних доріг потрібно брати з урахуванням розсипання штабелів при пожежі, але не менше ніж 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

поздовжніх розривів між штабелями $b_{нов} = 8 \cdot 2 = 16$ м; ширина поперечних розривів між штабелями $b_{нон} = 5$ м; загальна кількість поздовжніх рядів кварталу 5 сумарною шириною 94 м; загальна кількість поперечних рядів 18 сумарною довжиною 193 м; загальна площа кварталу $18 \cdot 142 \text{ м}^2 \approx 1,8$ 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 потрібно 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 за допомогою гучномовного розпорядливо-пошукового диспетчерського зв'язку та звукової 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 м³ повинні бути протипожежний водопровід низького тиску та насосні станції протипожежного водопроводу. Насосні станції слід розміщувати на відстані не менше як 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 ε_o можна визначити за залежністю

$$\varepsilon_o = \varepsilon_c \varepsilon_{з.с} \varepsilon_{т.с} \varepsilon_{е.м} \varepsilon_{н.с}, \quad (3.33)$$

де ε_c – ризик відмови пожежного сповіщувача; $\varepsilon_{з.с}$ – ризик відмови звукової сигналізації; $\varepsilon_{т.с}$ – ризик відмови телевізійної системи спостереження; $\varepsilon_{е.м}$ – ризик відмови електричної мережі; $\varepsilon_{н.с}$ – 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 τ за результатами досліджень беремо так:

- для пожежних сповіщувачів розподіл відповідає експоненціальному при $b = 1$;
- для звукової сигналізації розподіл відповідає експоненціальному при $b = 1$;
- для телевізійної системи спостереження розподіл відповідає розподілу Вейбулла при $b = 2$;
- для електричної мережі розподіл відповідає розподілу Вейбулла при $b = 2$;
- для 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 з рекомендаціями, які ґрунтуються на дворічному терміні гарантії на радіоелектронну апаратуру, визначаємо $a_{3.c} = T_{B.3.c} = 2 \cdot 365 \cdot 24 = 17520$ год, $\lambda_{3.c} = 1/T_{B.3.c} = 1/17520 = 5,7 \cdot 10^{-5}$ відмов/год; $\tau_c = 8760$ год. У цьому випадку отримаємо

$$\varepsilon_{3.c} = 1 - \exp(-\lambda_{3.c} \tau_{3.c}) = 1 - \exp(-5,7 \cdot 10^{-5} \cdot 8760) = 0,39.$$

Аналогічно визначаємо ризик відмови телевізійної системи спостереження за залежністю

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

За правилами влаштування електроустаткувань час напрацювання електричної мережі на відмову становить 20 років. Тоді

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

а $\tau_{e.m} = 87600$ год. У 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 електроустаткувань, визначаємо з урахуванням часу напрацювання на відмову $a_{n.c} = T_{B.n.c} = 2 \cdot 365 \cdot 24 = 17520$ год, за час експлуатації один рік, тобто $\tau_{n.c} = 8760$ год. Спочатку визначаємо квантиль нормального розподілу

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

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

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

Тоді маємо

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

У 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 перейдімо до визначення за цих же умов екологічного ризику у разі 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 скористаємося відомими даними роботи [105]. Висота полум'я від основи штабеля при швидкості вітру $V_{\text{в}} = 4$ м/с становить 6 м. Напрямок вектора швидкості вітру збігається з напрямом поздовжніх рядів штабелів (найгірший варіант). Висота конвективної колонки з продуктами горіння за відомими даними для лісових пожеж у 20...30 разів більша від висоти полум'я. Швидкість розповсюдження фронту пожежі $V_{\text{ф}}$ по відкритому складу лісоматеріалів при швидкості вітру $V_{\text{в}} = 4$ м/с знаходиться в межах: за початковий час $\tau_1 = 10$ хв – $V_{\text{ф}1} = 1,5$ м/хв; потім зростає до $V_{\text{ф}2} = 3,3$ м/хв. Розглянемо випадок, коли пожежа переміщується вздовж поздовжніх рядів. Загальна довжина кварталу відкритого шахтного складу лісоматеріалів дорівнює 193 м. За початковий час $\tau_1 = 10$ хв пожежа розповсюдиться на довжину, яка дорівнює $l_{\text{п}1} = V_{\text{ф}1} \cdot \tau_1 = 1,5 \cdot 10 = 15$ м. Залишок довжини кварталу складу $l_{\text{п}2} = 193 - 15 = 178$ м буде охоплений полум'ям за $\tau_2 = 178/3,3 = 53,9$ хв, тобто весь квартал складу пожежа охопить 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 $V_{\text{в}} \cdot \tau = 4 \cdot 60 \cdot 63,9 = 15\,336$ м. Тоді загальна площа розповсюдження продуктів горіння становитиме $S_{\text{н.г}} = 94 \cdot (193 + 15336) = 1\,459\,726 \text{ м}^2 \approx 146$ га. При середньому значенні висоти конвективної колонки $H = 6 \cdot 25 = 150$ м об'єм розповсюдження продуктів горіння над кварталом складу, який охоплений пожежею, дорівнюватиме $V_{\text{н.г}} = S_{\text{н.г}} H = 1459726 \cdot 150 = 218\,958\,900 \text{ м}^3$.

Згідно з 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 $V = 6,4$ кг/м²хв. Тоді за час $\tau =$

63,9 хв при площі пожежі $S_{II} = 94 \cdot 193 = 18142 \text{ м}^2$ 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 $V_{n,z}$ [135]:

- діоксиду 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 г/м^3 , які знаходяться в об'ємі навколишнього середовища $V_{n,z}$ за залежністю

$$K_i = \frac{10^3 m_i}{V_{n.г}}$$

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 μ [60]

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

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; ψ_n – питома швидкість вигорання, кг/м²с; D – димоутворювальна здатність, Нп·м²/кг наведені в ГОСТ 12.1.004 – 91 (додаток 4);

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

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

Аналізуючи отримані результати, можна зауважити, що на загрозу екологічної безпеки при виникненні пожеж на відкритих складах лісоматеріалів великою мірою впливає швидкість вітру та тривалість вільного горіння, тобто час до початку гасіння пожежі пожежно-рятувальними підрозділами.

Наприклад, зі зменшенням швидкості вітру у два рази, а саме з 4 м/с до 2 м/с, зменшується площа розповсюдження продуктів горіння. У нашому прикладі зі 146 га до 73,9 га. Відповідно зменшується об'єм розповсюдження продуктів горіння також приблизно удвічі, що призводить до збільшення концентрації токсичних продуктів у два рази. У 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 г/м^3 , що унеможлиблює перебування людини на цій території.

Крім цього, гранична видимість від задимлення зменшується до 4 м, що унеможлиблює використання автотранспорту 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 за умови впровадження оптимальних заходів пожежогасіння, які дозволяють оперативно виконувати процес локалізації та гасіння пожежі.

Одним з таких напрямів 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 на місце 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 працюватиме на тих ділянках, де виникла пожежа, тобто на тих ділянках, звідки надійшов сигнал від пожежного сповіщувача. Такий підхід ґрунтується на багаторічному аналізі статистичних даних, згідно з якими встановлено, що більшість пожеж на відкритих складах виникає від впливу людського чинника (необережне поводження з вогнем). Також встановлено, що 96% пожеж починається на периметрі складу.

Наступним заходом зі зменшення ризику виникнення пожежі та зменшення часу вільного горіння у разі її виникнення є впровадження на відкритих складах лісоматеріалів добровільних пожежних команд із забезпеченням їх пожежним спорядженням (захисний одяг, пожежні рукава, ручні пожежні стволи тощо).

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

Екологічний ризик ε_e , виходячи з основних положень екологічної безпеки, визначатимемо за залежністю

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

де ε_o – пожежний ризик для відкритого шахтного складу лісоматеріалів, визначений за залежністю (3.33); $P_{пр.л}$ – імовірність присутності людей на складі лісоматеріалів; $P_{ев.л}$ – імовірність успішної евакуації людей зі складу лісоматеріалів при виникненні пожежі; $R_{сн}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи системи оперативного сповіщення; $R_{авт}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи автоматичної системи пожежогасіння; $[\varepsilon_e] = 10^{-7}$ – допустиме значення

прийняттого екологічного ризику (якщо $[\varepsilon_e]=10^{-6}$, то таке значення відповідає гранично допустимому значенню екологічного ризику).

Розглянемо визначення невідомих складових залежності (3.34).

1. Імовірність присутності людей $P_{пр.л}$ на складі лісоматеріалів

$$P_{пр.л} = \frac{\tau_{пр.л}}{24},$$

де $\tau_{пр.л}$ – час присутності людей на робочих місцях, год; в більшості випадків для відкритих шахтних лісоскладів $\tau_{пр.л} = 8$ 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 τ_k – критичний час пожежі, тобто це час, впродовж якого ще не виникає загроза від пожежі для навколишнього середовища та життєво важливим інтересам людини і громадянина, хв; для відкритих складів лісоматеріалів $\tau_k = 5...10$ хв; τ_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; $V_e = 66...90$ м/хв – середня швидкість вільного руху людського потоку, м/хв; $\tau_{n.e} = 3...6$ 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; τ_{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 $R_{авт}(\tau)$ потрібно розрахувати квантиль нормального розподілу з урахуванням кількості вмикань τ 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.

У нашому прикладі визначимо екологічний ризик 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 ε_e для відкритого шахтного складу лісоматеріалів за залежністю (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 з 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)

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

Розрахунки показали, що екологічна безпека від пожежі на відкритому складі лісоматеріалів забезпечена. Це підтверджується значенням екологічного ризику, який менший від допустимого прийнятного значення. На забезпечення екологічної безпеки для нашого прикладу передусім впливає впровадження оптимальних заходів системи пожежогасіння. Звідси випливає висновок, що екологічною безпекою можна керувати завдяки практичній реалізації адміністративно-правових та економічних методів, а саме потрібно додатково впровадити систему оперативного сповіщення про пожежу, автоматичну водяну систему пожежогасіння, а також організувати добровільну пожежну

команду. Безумовно, це вимагає додаткових капіталовкладень, але їх окупність очевидна.

Результати виконаної роботи щодо екологічної безпеки дозволили зробити такі висновки:

- встановлено, що екологічний ризик при імовірності виникнення пожежі на відкритих шахтних складах лісоматеріалів насамперед залежить від пожежного ризику. Зменшення пожежного ризику призводить до зменшення екологічного ризику;

- на екологічну безпеку великою мірою впливає швидкість вітру. Зменшення швидкості вітру при пожежі на відкритих складах лісоматеріалів у два рази, наприклад, з 4 м/с до 2 м/с, зменшує площу розповсюдження продуктів горіння приблизно удвічі, і в багатьох випадках навіть унеможливорює перебування людини на цій території;

- екологічною безпекою на відкритих складах лісоматеріалів можна керувати завдяки практичній реалізації адміністративно-правових і економічних методів.

Висновки

1. Розроблено з використанням графових моделей методологію визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах лісоматеріалів, яка дає змогу залежно від виду лісоматеріалів і місця виникнення пожежі визначати швидкість розповсюдження фронту пожежі по кварталу складу та площу пожежі залежно від тривалості вільного горіння.

2. Встановлено, що швидкість фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів за однакових умов приблизно у 3...3,5 разу більша від швидкості фронту пожежі на відкритих складах круглих лісоматеріалів.

3. На швидкість фронту пожежі істотно впливає швидкість і напрям дії вітру. Результати аналізу графових моделей показали, що зі збільшенням швидкості вітру до 10 м/с у порівнянні з безвітряною погодою швидкість

фронту пожежі: 1) при бічному вітрі $\alpha_6 = 45^\circ$ збільшується на 21,4%; 2) при попутному вітрі $\alpha_6 = 90^\circ$ збільшується на 26,6%; 3) при зустрічному вітрі $\alpha_6 = 270^\circ$ зменшується приблизно у 3,5 разу.

4. Встановлено, що тривалість вільного розповсюдження пожежі залежить від місця її виникнення на кварталі складу. Найбільша тривалість вільного поширення пожежі – у разі її виникнення на зовнішньому куті кварталу, а найменша – у центрі кварталу. Різниця в цьому випадку сягає до двох разів.

5. Розміри екологічної безпечної ситуації великою мірою залежать від пожежного ризику об'єкта. Зменшення пожежного ризику приводить до зменшення екологічної небезпеки.

6. На екологічну безпеку вагомо впливає швидкість вітру. Зменшення швидкості вітру при пожежі на відкритих складах лісоматеріалів, наприклад, у два рази, зменшує об'єм розповсюдження продуктів горіння приблизно удвічі. При цьому в деяких випадках завдяки збільшенню концентрації токсичних продуктів від пожежі у зменшеному об'ємі унеможлиблюється перебування людини на цій території.

7. Для зменшення розмірів або запобігання екологічній безпеці 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 критерію для прийняття рішення в умовах невизначеності [159]. Для оптимізації тривалості часу локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах застосовують оцінку мінімальних витрат та збитків, які пов'язані з ліквідацією пожежі, зокрема йдеться про оптимальну кількість 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, у якому розробляють питання 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. Для всіх інших об'єктів 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 здебільшого призводить до значних збитків. Наприклад, в Україні за 2014 рік тільки прямі збитки від пожеж становили 1 489 741 тис. грн [102]. І за статистикою ці збитки щороку збільшуються. Наприклад, у 2014 році вони збільшилися у 2,2 разу, якщо порівняти з 2013-м. Наведені збитки від пожеж можна пояснити головню тим, що не на належному рівні розроблено оперативні плани і картки пожежогасіння, у яких в умовах невизначеності не наведено потрібної кількості сил і засобів ліквідації пожежі для відповідного об'єкта.

Для зменшення збитків від пожежі передусім потрібно кожному пожежно-рятувальному підрозділу знати і дотримуватися оптимальної тривалості часу вільного розвитку пожежі, локалізації, гасіння та ліквідації пожежі на об'єкті, де вона виникла. Тому для кожного об'єкта важливо розробляти кілька варіантів оперативних планів або карток пожежогасіння і на підставі їх аналізу з використанням відповідного критерію оптимізації приймати найбільш раціональний варіант ліквідації пожежі, який забезпечував би визначений критерій. Однак на практиці пожежно-рятувальні підрозділи такий підхід по суті не застосовують. Це пов'язано насамперед з тим, що наявні критерії не охоплюють всіх основних чинників ліквідації пожежі. На цій основі ставиться проблема у визначенні такого критерію, який забезпечував би вибір обґрунтованого варіанта ліквідації пожежі та мінімальні збитки від пожежі і для об'єкта, і для пожежно-рятувального підрозділу на її ліквідацію. Тому розв'язування проблеми визначення критерію ухвалення рішення для оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах є важливим й актуальним завданням сьогодення.

4.2 Вибір та обґрунтування критерію оптимізації

Для розроблення оперативних планів і карток пожежогасіння для кожного об'єкта необхідно на підставі основних положень теорії прийняття рішень ухвалити найбільш вірогідне рішення P_{ij} щодо ліквідації пожежі з його оцінкою за відповідним варіантом B_i та умовами U_j , які можуть характеризуватися відповідними економічними показниками [138, 162, 179, 243, 250]. Такими показниками можуть бути, наприклад, витрати у вигляді прямих збитків об'єкта від пожежі $B_{o,j}(\tau)$ та витрати пожежно-рятувальних частин $B_{ni}(\tau)$ на ліквідацію пожежі за i -м варіантом прийнятого рішення в j -й ситуації розвитку пожежі [179]

$$P_{ij} = B_{oj}(\tau) + B_{ni}(\tau). \quad (4.1)$$

Використовуючи рівняння (4.1), у пожежній практиці розглядають такі основні критерії для оптимізації тривалості часу ліквідації пожежі: 1) мінімаксний критерій (ММ) на основі песимістичної позиції; 2) критерій Байєса-Лапласа; 3) критерій Севіджа; 4) критерій Гурвіца; 5) критерій Ходжа-Лемана; 6) критерій Гермейєра; 7) критерій добутку; 8) критерій нейтралітету; 9) оптимістичний критерій [138]. Наведені критерії можна використовувати за умові орієнтовного прогнозування виникнення пожежних ситуацій та розрахунку відповідної кількості сил і засобів для ліквідації пожежі у 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 немає статистичних даних для точного розрахунку значення P_{ij} . Тому в пожежній практиці доцільно використовувати тільки критерій Севіджа або мінімаксний критерій (ММ) на основі песимістичної позиції. Використання цих критеріїв для ухвалення рішень не завжди дає оптимальні результати, але на їх основі можна отримати «достатньо» раціональні рішення [138].

Для прийняття рішення з ліквідації пожежі в умовах невизначеності використовують також так званий різницевий критерій, який складається з двох часткових критеріїв [150]. 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 критерію прийняття рішення в умовах невизначеності в пожежній практиці при розробленні оперативних планів і карток пожежогасіння найдоцільнішими на сучасному етапі є такі критерії: критерій Севіджа, мінімаксий критерій (ММ) на основі песимістичної позиції та різницевий критерій. На підставі цього висновку постає мета розробити метод визначення більш досконалого за своїм значенням критерію 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 $\tau_{з.п.п}$):

– 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

$$\tau_{з.п.п} = \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз} + \tau_{лок} + \tau_{г} + \tau_{лік}, \quad (4.4)$$

де $\tau_{лок}$ – час локалізації пожежі, хв; τ_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) наведено в 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 (у 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]

$$\tau_{лок} = \frac{6,39S_{лок}^{0,893}}{2N_A + N_B^{\Gamma}} K_I K_d, \quad (4.6)$$

де $S_{лок}$ – площа локалізації, м²; K_I – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання I_n^{Γ} (л/м²с) в осередок пожежі вогнегасної речовини (рекомендоване значення для ручних стволів $I_n^{\Gamma} = 0,2$ л/м²с); 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 разі використання стволів A і B беруть 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; $K_I = 1,62 - 3,04I_n^{\Gamma}$;

$K_d = 1,4983 - 0,0262d$; α – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі: кругова (360°) $\alpha = 3,14$ рад.; кутова (180°) $\alpha = 1,57$ рад.; кутова (90°) $\alpha = 0,785$ рад.; N_B^r – кількість стволів B на локалізацію і гасіння пожежі [157]

$$N_B^r = \frac{S_{\Pi} I_n^r}{Q_B}; \quad (4.7)$$

N_B^3 – кількість стволів B на захист

$$N_B^3 = \frac{0,25 K_3 S_{\Pi} I_n^r}{Q_B}; \quad (4.8)$$

Q_B – розхід вогнегасної речовини стволом B , л/с (розхід при тиску вогнегасної речовини 0,4 МПа і діаметрі 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]

$$N_A = 0,3 N_B^r. \quad (4.9)$$

На підставі отриманих даних визначаємо загальну кількість стволів $N_B = N_B^r + N_B^3$ та $N_{\Sigma} = N_A + N_B^r + N_B^3$. Крім цього, визначаємо потрібну кількість відділень N_{ϵ} для ліквідації пожежі

$$N_{\epsilon} = 0,25(2N_A + N_B + 0,17N_{\Sigma} + 2). \quad (4.10)$$

Складову τ_2 можна визначити за залежністю

$$\tau_z = \tau_{\text{лок}} \left(\frac{S_{\Pi}}{S_{\text{лок}}} - 1 \right), \quad (4.11)$$

де S_{Π} – площа пожежі, м².

Після цього визначаємо час $\tau_{\text{лік}}$ на закінчення ліквідації пожежі (кінцева ліквідація спалахів після гасіння) за залежністю

$$\tau_{\text{лік}} = 0,25(\tau_{\text{лок}} + \tau_z). \quad (4.12)$$

Визначивши прогнозовані тривалості часів вільного розвитку пожежі та зайнятості ПРП для її ліквідації, ставимо для визначення критерію 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 критерію прийняття рішення для оптимізації процесу локалізації та гасіння пожежі на деревообробних підприємствах.

Для визначення втрат об'єкта від пожежі використаємо залежність

$$B_o = C_o S_{\Pi}, \quad (4.13)$$

де C_o – середня вартість одного квадратного метра площі об'єкта, яка знищена пожежею, грн/м²; S_{Π} – площа об'єкта, яка знищена пожежею, м².

Для визначення площі S_{Π} скористаємося рекомендаціями, наведеними в роботі [176]. У цьому випадку отримаємо

$$S_{\Pi} = S_{\Pi 1} + S_{\Pi 2} + S_{\Pi 3}, \quad (4.14)$$

де $S_{П1}$ – площа пожежі за перші 10 хв вільного розвитку пожежі, м²; $S_{П2}$ – площа пожежі за час вільного розвитку пожежі без урахування перших 10 хв, м²; $S_{П3}$ – площа пожежі за час локалізації пожежі, м².

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. У цьому випадку площу 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

$$S_{П2} = (\tau_{в.г} - 10)^2 V_l^2 \alpha. \quad (4.16)$$

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

$$B_o = C_o V_l^2 \alpha (\tau_{в.г}^2 - 20\tau_{в.г} + 0,25\tau_{лок}^2 + 125). \quad (4.18)$$

Для визначення втрат B_n пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі використаємо середню вартість C_n однієї хвилини роботи ПРП піз час ліквідації пожежі та результат залежності (4.4). На підставі цих даних отримаємо

$$B_n = C_n \tau_{з.л.л.} \cdot \quad (4.19)$$

Для встановлення оптимального значення критерію прийняття рішення для оптимізації процесу локалізації та гасіння пожежі застосуємо залежності (4.18), (4.19) і (4.4). Відтак запишемо розгорнуту суму рівнянь (4.18) і (4.19)

$$\begin{aligned} y = & C_o V_l^2 \alpha \tau_{в.з}^2 - 20 C_o V_l^2 \alpha \tau_{в.з} + 0,25 C_o V_l^2 \alpha \tau_{лок}^2 + 125 C_o V_l^2 \alpha + C_n \tau_{о.о} + \\ & + C_n \tau_{з.с} + C_n \tau_{зб} + C_n \tau_{сл} + C_n \tau_{роз} + 1,25 C_n \left(\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}} - 1 \right) \tau_{лок} + 0,25 C_n \tau_{лок}. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Визначаємо похідну по часу τ від функції (4.20) та прирівнюємо її значення до нуля

$$\frac{dy}{d\tau} = C_o V_l^2 \alpha (2\tau_{в.з} - 20) + 0,5 C_o V_l^2 \alpha \tau_{лок} + 5,25 C_n + 1,25 C_n \left(\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}} - 1 \right) = 0. \quad (4.21)$$

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 τ

$$\tau_{лок.оп} = 8 - \frac{C_n [4 + 1,25 \left(\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}} \right)]}{2,5 C_o V_l^2 \alpha}. \quad (4.22)$$

Тривалість гасіння пожежі визначаємо за залежністю (4.11), а тривалість закінчення ліквідації пожежі – за залежністю (4.12). Крім цього, використовуючи залежність (4.6), можна виконати перевірку правильності прийняття необхідної кількості приладів для локалізації та гасіння пожежі. У цьому випадку повинна виконуватися умова

$$\tau_{\text{лок}} = \frac{6,39 \{ \alpha h [10V_{\text{л}} + 2V_{\text{л}}(\tau_{\text{в.г}} - 10) - h] \}^{0,893}}{2N_A + N_B^{\Gamma}} K_I K_d \leq \tau_{\text{лок.оп}}. \quad (4.23)$$

Виконання умови (4.23) дозволяє отримати в процесі ліквідації пожежі на об'єкті мінімальні втрати і для об'єкта, 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 наявних критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності дав змогу розробити критерій для оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах;
- за основу при розробленні критерію оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж було взято тривалість часу для виконання операції локалізації, що дозволяє обґрунтовано перевірити загальну кількість приладів для ліквідації пожежі загалом;
- розроблений критерій оптимізації процесів локалізації та гасіння пожеж дає змогу обґрунтовано розробляти оперативні плани і картки пожежогасіння для деревообробних підприємств.

4.3 Статистичне моделювання надійності пожежної техніки для локалізації та гасіння пожежі

Серед усіх чинників, які впливають на процес ліквідації пожежі (професійна майстерність пожежників, надійність пожежної техніки, мобільне керування тактикою гасіння), найвпливовішим є надійність пожежної техніки. Деякі дослідники [53] вказують, наприклад, що через несправність пожежної техніки тривалість ліквідації пожежі може збільшуватися удвічі.

Як наслідок, втрати будуть більшими і для об'єкта, і для пожежно-рятувального підрозділу.

Як ми вже відзначали в першому розділі, у наявних стандартах щодо пожежно-рятувального обладнання та техніки, а також у науково-технічній [195, 247] та довідниковій літературі не вказано значень основних показників надійності (ймовірності безвідмовної роботи $R(\tau)$ та коефіцієнта готовності $A(\tau)$ кожного елемента і системи загалом) для пожежно-рятувального обладнання і техніки. Тому важливо визначити бодай наближені до дійсних значень основні показники надійності пожежної техніки, адже це дасть змогу забезпечити якісну ліквідацію пожежі.

Нагадаємо, що в 1990-х роках було розроблено ДСТУ, в яких почали вводити значення показників надійності пожежної техніки. Так, у ДСТУ 3286-95 (ГОСТ 26938-95) наведено значення тривалості напрацювання на відмову у вигляді пробігу автомобілем 5000 км при швидкості руху 50 км/год, що відповідає $T_B = 100$ год (це значення не є обґрунтованим). До того ж, окрім цього показника надійності в стандарті нічого більше не наведено. Зважаючи на це, неможливо щось прогнозувати щодо ймовірності безвідмовної роботи.

Згодом для уточнення T_B було запропоновано метод статистичного моделювання, тобто методику для уточнення значень показників надійності [206]. Втім, проблема полягає в тому, що досі дослідники не розглядали визначення основних показників надійності для пожежної техніки як для системи, яка складається з багатьох елементів. Тому постає завдання розробити методологію визначення основних показників надійності пожежної техніки з урахуванням надійності кожного її складового конструктивного елемента, що сприятиме забезпеченню якісної локалізації і гасіння пожежі.

Аби розв'язати порушену проблему, потрібно розглянути методологію визначення основних показників надійності пожежної техніки, з урахуванням якої забезпечується можливість якісної локалізації та гасіння пожежі [47, 56]. Для цього важливо вирішити такі завдання: 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 блока пожежної техніки за допомогою методу статистичного моделювання; 3) розробити метод врахування основних показників надійності пожежної техніки при визначенні її необхідної кількості для ліквідації пожежі.

1. Вибір основних типів пожежної техніки для ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах. Пожежі на деревообробних підприємствах гасять головно 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, насамперед потрібно поставити автоцистерни пожежні на найближчі вододжерела і розгорнути пожежні рукави від вододжерел до осередку пожежі, зокрема від гідрантів кільцевої господарчо-пожежної водної магістралі високого тиску.

Адже відповідно до основних положень пожежної безпеки для деревообробних підприємств під час їх будівництва застосовують кільцеві господарчо-пожежні водні магістралі високого тиску. Для забору води з гідрантів цієї магістралі використовують пожежні колонки типу КП У1 ДСТУ 2801–94. Від пожежної колонки за допомогою пожежного рукава 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 блока виділимо основні конструктивні елементи, які впливають на її значення. До таких елементів можна віднести: замок запалення автомобіля, акумулятор, реле стартера автомобіля, стартер, автомобільний двигун, коробку швидкостей, коробку відбору потужності, карданну передачу, пожежний насос відцентровий.

До третього блока надійності пожежної техніки відносять: рукав пожежний напірний від насоса пожежного відцентрового до триходового

розгалуження рукавного, три паралельні рукави пожежних напірних, три паралельно працюючі пожежні стволи ручні, з яких один ствол А, а два стволи В.

2. *Визначення значень основних показників надійності конструктивних елементів кожного блоку пожежної техніки за допомогою методу статистичного моделювання.* Для визначення основних показників надійності всіх блоків пожежної техніки скористаємося методом статистичного моделювання [77, 206]. Цей метод використовують для уточнення значення тривалості напрацювання на відмову. За основу для виконання методу статистичного моделювання беруть закон розподілу Вейбулла, а саме імовірність безвідмовної роботи

$$R(\tau) = \exp \left[- \left(\frac{\tau}{T_B} \right)^b \right], \quad (4.25)$$

де τ – 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; 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 τ_i виконання роботи елементом конструкції у часі або у циклах за залежністю (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 τ встановлено експериментально; 2) напрацювання τ за залежністю (4.26), якщо параметри розподілу T_B і b відомі для аналогічних виробів чи систем. У нашому випадку будемо використовувати перший напрям моделювання.

Статистичну оцінку імовірності того, що час безвідмовної роботи τ системи не перевищує τ_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 беруть графічний метод з використанням пакета прикладних програм Microsoft Excel. Після побудови графічної залежності на неї накладають лінію тренду 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 α лінії тренду до осі X .

Після виконання нескладних 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 будуємо графічну залежність (рис. 4.1).

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 τ_i , циклів за залежністю (2)	214	315	232	437	334	250	519	68	489	130
3	Впорядкований ряд τ_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

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 $c = 4,3$

$$T_B = 10^{\frac{4,3-0,362}{1,54}} = 360 \text{ циклів.}$$

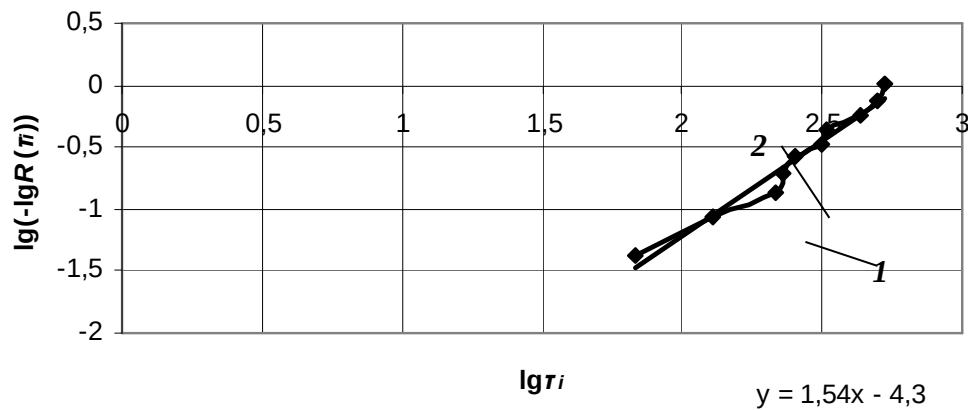


Рис. 4.1. Розподіл напрацювання на відмову колонки пожежної:
1 – крива розподілу; 2 – лінія тренду

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 $A(\tau)$ дорівнюватиме

$$A(\tau) = \frac{T_B}{T_B + T_{\text{від}}} = \frac{180}{180 + 4} = 0,978,$$

де $T_{\text{від}}$ – тривалість відновлення колонки пожежної після першої відмови;
 $T_{\text{від}} = 4$ год [192].

Аналогічно було визначено значення тривалості напрацювання на відмову, імовірності безвідмовної роботи та коефіцієнти готовності для всіх трьох блоків надійності пожежної техніки з використанням джерел [76, 85, 92, 155, 160, 181, 247]. 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. Блиставиця, Київська область; м. Костопіль, Рівненська область; смт Новий Яричів Кам'янка-Бузького району, Львівська область та багато інших). Результати цих розрахунків наведено 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.

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 τ	Імовірність безвідмовної роботи $R(\tau)$	Коефіцієнт готовності $A(\tau)$
1	2	3	4	5	6
Перший блок пожежної техніки					
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
Другий блок пожежної техніки					
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					
12	Рукав пожежний напірний типу Т У1 ДСТУ 3810–98 від насоса до триходового розгалуження	8600 год	4 год	0,9995	0,99
13	Триходове розгалуження рукавне типу РТ-70 У ДСТУ 2111-92 (на кожний рукав)	200 циклів	10 циклів	0,951	0,98
14	Три паралельні рукави пожежних напірних типу Т У1 ДСТУ 3810–98 (на кожний рукав)	8600 год	4 год	0,9995	0,99
15	Три паралельно працюючі пожежні ручні стволи (на кожний ствол)	160 циклів	16 циклів	0,905	0,91

Перший блок пожежної техніки являє собою систему з послідовним з'єднанням елементів, відмови яких статистично незалежні. У цьому випадку імовірність безвідмовної роботи такої системи можна визначити так:

$$R_{Б1}(\tau) = \prod_{i=1}^{n_1} R_i(\tau), \quad (4.32)$$

де n_1 – кількість елементів пожежної техніки в першому блоці; $R_i(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи i -го елемента.

Другий блок пожежної техніки, як і перший, становить систему з послідовним з'єднанням елементів. Імовірність безвідмовної роботи визначаємо аналогічно до першого блоку

$$R_{B2}(\tau) = \prod_{i=1}^{n_2} R_i(\tau), \quad (4.33)$$

де n_2 – кількість елементів пожежної техніки у другому блоці.

Третій блок пожежної техніки охоплює 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:

$$R_{B3}(\tau) = R_1(\tau) \left[1 - \prod_{i=2}^{n_3} (1 - R_i(\tau)) \right], \quad (4.34)$$

де n_3 – кількість елементів пожежної техніки в третьому блоці.

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

$$R_c(\tau) = \prod_{i=1}^3 R_{Bi}(\tau). \quad (4.35)$$

На другому етапі врахуємо значення $R_c(\tau)$ (надійності) при визначенні необхідної кількості пожежної техніки для ліквідації пожежі.

$$N_{B_H} = \frac{N_B^I + N_B^3}{R_c(\tau)}, \quad (4.36)$$

де N_B^r , N_B^3 – 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_B^r на підставі рекомендацій [92]

$$N_{A_H} = \frac{0,3N_B^r}{R_c(\tau)} . \quad (4.37)$$

Розглянемо вплив значення імовірності безвідмовної роботи всієї системи для ліквідації пожежі на зміну кількості пожежної техніки. Для цього скористаємося даними табл. 4.2 та залежностями (4.32) – (4.37). Результати розрахунків показали, що для забезпечення ліквідації пожежі з урахуванням надійності пожежної техніки її кількість потрібно збільшувати на 16,4%.

Результати аналізу запропонованого методу статистичного моделювання дозволили зробити такі висновки:

- використання методу статистичного моделювання дало змогу 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 ($R_{B2}(\tau) = 0,915$);

- основним показником надійності ремонтпридатної пожежної техніки є коефіцієнт готовності, на значення якого впливає передусім 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 визначенні кількості пожежної техніки враховувати її надійність. Результати досліджень

показують, що із врахуванням надійності кількість пожежної техніки потрібно збільшувати на 16,4%. При визначені, наприклад, 10 стволів, за такою методикою, їх кількість необхідно збільшити на 2 стволи і відповідно кількість пожежників.

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 цеху

Стосовно розроблення математичної моделі оптимізації сил і засобів ліквідації пожеж у закритих приміщеннях можна зазначити, що таких моделей науковці ще не розглядали [30, 33, 163, 213, 227]. Щоправда, були праці щодо визначення часу гасіння пожежі залежно від кількості одиниць відповідних приладів для її гасіння [154]. Окрім цього, коли визначали засоби ліквідації пожежі, не враховували їх надійності. На кількість засобів і сил ліквідації пожежі насамперед впливає тривалість вільного розвитку пожежі, від якої залежить величина її площі [262].

Для розроблення алгоритму оптимізації сил і засобів потрібно розглянути кілька 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 поширення дорівнює $0,5V_L$, де V_L – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/хв. За понад 10 хв швидкість розповсюдження пожежі дорівнює V_L . У цьому випадку:

$$\tau_{e,z} = \tau_{e,z,1} + \tau_{e,z,2},$$

де $\tau_{e,z,1} \leq 10$ хв; $\tau_{e,z,2} > 10$ 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

$$S_{\text{П1}} = 0,25V_{\text{л}}^2 \tau_{\text{в.з.1}}^2 \alpha, \quad (4.38)$$

де α – 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

$$S_{\text{П}} = [0,25V_{\text{л}}^2 \cdot 10^2 + (\tau_{\text{в.з}} - 10)^2 V_{\text{л}}^2] \alpha = [25 + (\tau_{\text{в.з}} - 10)^2] V_{\text{л}}^2 \alpha. \quad (4.39)$$

Для прямокутної пожежі при її ширині b_n за умови, що $\tau_{\text{в.з}} \leq 10$ хв площа пожежі буде

$$S_{\text{П1}} = 0,5b_n V_{\text{л}} \tau_{\text{в.з.1}}. \quad (4.40)$$

У випадку, коли $\tau_{\text{в.з}} > 10$ хв, площа прямокутної пожежі буде

$$S_{\text{П}} = b_n V_{\text{л}} (\tau_{\text{в.з}} - 5). \quad (4.41)$$

На другому етапі визначаємо кількість приладів для подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі. Для цього скористаємося 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

$$N_{A_H} = \frac{N_A}{R_c(\tau)}; N_{B_H}^I = \frac{N_B^I}{R_c(\tau)}; N_{B_H}^3 = \frac{N_B^3}{R_c(\tau)}. \quad (4.42)$$

Значення кількості кожного ствола заокруглюють до цілого числа в більшу сторону. На підставі отриманих даних визначаємо загальну кількість стволів N_Σ і стволів N_{B_H} для ліквідації пожежі

$$N_\Sigma = N_{A_H} + N_{B_H}^I + N_{B_H}^3; \quad (4.43)$$

$$N_{B_H} = N_\Sigma - N_{A_H}. \quad (4.44)$$

На третьому етапі визначаємо потрібну кількість відділень N_ϵ для ліквідації пожежі

$$N_\epsilon = 0,25(2N_{A_H} + N_{B_H} + 0,17N_\Sigma + 2), \quad (4.45)$$

де 0,25 – коефіцієнт, який враховує середню кількість особового складу для гасіння пожежі (4 особи) 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_ϵ заокруглюють до цілого числа в більшу сторону.

На четвертому етапі визначаємо потрібну кількість пожежної техніки. Загальна кількість пожежних:

- автоцистерн

$$N_{n,a} = N_{\epsilon} ; \quad (4.46)$$

- спеціальних машин

$$N_{n,c} = 0,011N_n \geq 1, \quad (4.47)$$

де N_n – загальна кількість працівників цеху, які є у приміщенні на час виникнення пожежі.

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 скористаємося залежностями (4.11), (4.12) і (4.23)

$$\tau_{лок} = \frac{6,39\{\alpha h[10V_{\text{л}} + 2V_{\text{л}}(\tau_{\text{г.з}} - 10) - h]\}^{0,893}}{2N_{A_H} + N_{B_H}^{\Gamma}} K_I K_d ; \quad (4.48)$$

$$\tau_{\text{з}} = \tau_{лок} \left(\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}} - 1 \right) ; \quad (4.49)$$

$$\tau_{лік} = 0,25(\tau_{лок} + \tau_{\text{з}}). \quad (4.50)$$

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 критерію оптимізації. Для цього скористаємося рекомендаціями [157]. Наслідки ліквідації пожежі оцінюємо за допомогою двох часткових критеріїв, тобто використовуємо суму прямих збитків 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 має 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)

$$B_o = C_o V_l^2 \alpha (\tau_{в.г}^2 - 20 \tau_{в.г} + 0,25 \tau_{лок}^2 + 125) ; \quad (4.53)$$

$$B_n = C_n \tau_{з.н.н} , \quad (4.54)$$

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/м²; C_n – середня вартість однієї хвилини роботи ПРП в процесі ліквідації пожежі, грн/хв; $\tau_{з.н.н}$ – час зайнятості ПРП для ліквідації пожежі, хв.

З урахуванням залежності (4.51) значення $\tau_{з.н.н}$ можна визначити так:

$$\tau_{з.н.н} = \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз} + \tau_l . \quad (4.55)$$

На цьому 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° , $\alpha = 1,57$ рад.) та значення лінійної швидкості її розповсюдження $V_l = 1,32$ м/хв [135], визначаємо вплив тривалості вільного горіння на площу пожежі S_{Π} (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Вплив тривалості вільного горіння $\tau_{в.г}$ на площу пожежі S_{Π}

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).

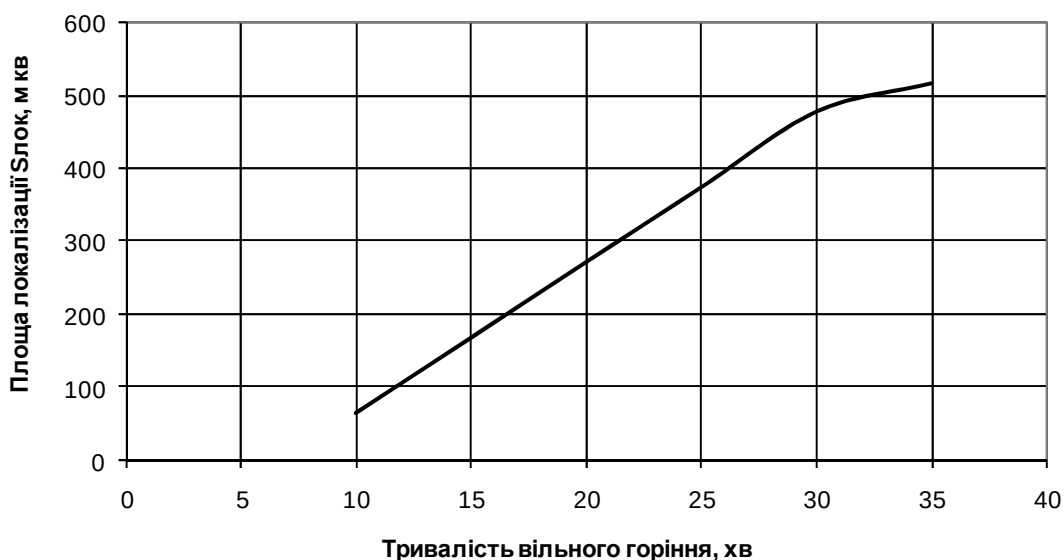


Рис. 4.3. Вплив тривалості вільного горіння $\tau_{в.г}$ на площу локалізації $S_{лок}$

3. Визначивши вплив $\tau_{в.г}$ на S_{Π} і $S_{лок}$, встановлюємо вплив тривалості вільного горіння на співвідношення $K = \frac{S_{\Pi}}{S_{лок}}$ (рис. 4.4).

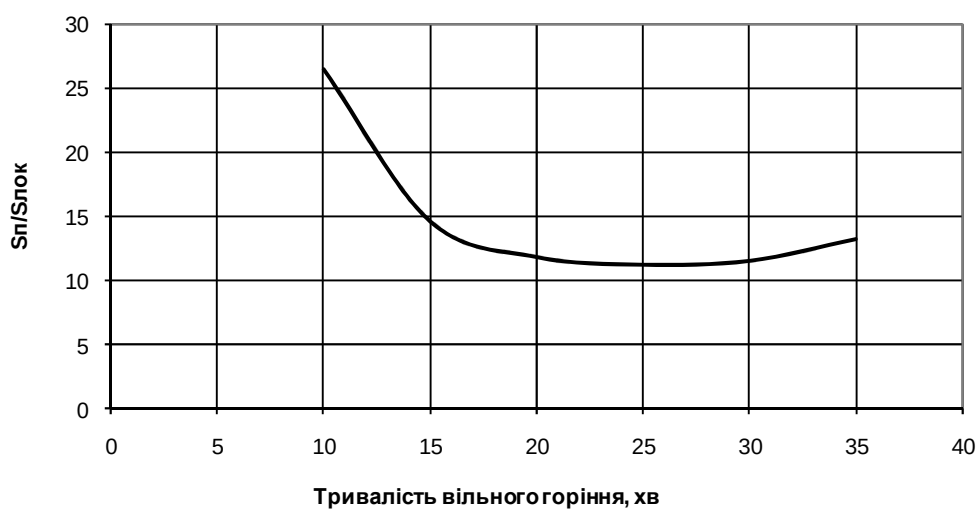


Рис. 4.4. Вплив тривалості вільного горіння $\tau_{в.г}$ на співвідношення $\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}}$

Отримана залежність не є лінійною і відповідає поліному четвертого степеня

$$K = 0,0002\tau_{6.2}^4 - 0,0253\tau_{6.2}^3 + 0,9768\tau_{6.2}^2 - 16,75\tau_{6.2} + 119,18. \quad (4.56)$$

Визначаємо похідну по часу $\tau_{6.2}$ від функції (4.56) та прирівнюємо її значення до нуля

$$\frac{dK}{d\tau_{6.2}} = 0,0008\tau_{6.2}^3 - 0,0759\tau_{6.2}^2 + 1,9536\tau_{6.2} - 16,75 = 0. \quad (4.57)$$

На підставі залежності (4.57) визначаємо оптимальне значення тривалості часу вільного горіння $\tau_{6.2.onm}$ в закритих приміщеннях цехів деревообробних підприємств. Для адекватності прийняття оптимального значення $\tau_{6.2.onm}$ були виконані численні 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 $\tau_{6.2.onm} = 19...25$ хв, тобто в цих межах співвідношення $\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}}$ 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 цехах деревообробних підприємств. Для цього випадку модель формується так:

функція мети

$$\tau_{л.і} \Rightarrow \min; \quad (4.58)$$

за критерієм

$$B_{o.i} + B_{n.i} \Rightarrow B_{\min}; \quad (4.59)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq N_{B_n i}^{\Gamma} \leq b_1; \quad (4.60)$$

$$a_2 \leq N_{B_n i}^3 \leq b_2; \quad (4.61)$$

$$a_3 \leq N_{A_n i} \leq b_3; \quad (4.62)$$

$$a_4 \leq \tau_{в.г.i} \leq b_4; \quad (4.63)$$

$$\tau_{лок.i} \leq \tau_{лок.оп}; \quad (4.64)$$

$$p_i \geq [p], \quad (4.65)$$

де a_1, a_2, a_3 – мінімальні значення обмежень, тобто наявна кількість 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 потрапляння досліджуваної i -ї 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 скористаємося методом Монте-Карло [59, 158]. Область допустимих розв'язків, яка визначається обмеженнями (4.60)...(4.64), оточують m -мірним паралелепіпедом, у якому проводимо дослідження. Поставлену задачу розв'язуємо з використанням ПЕОМ. За допомогою давача комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел μ_{ji} в інтервалі $0...1$. Для перетворення псевдовипадкових чисел μ_{ji} , які рівномірно розподілені в інтервалі $0...1$, до значень $N_{B_n i}^{\Gamma}$, $N_{B_n i}^3$, $N_{A_n i}$ та $\tau_{в.г.i}$ використовуємо залежності виду, наприклад, як для $N_{A_n i}$:

$$N_{A_n i} = a_3 + \mu_{3i}(b_3 - a_3), \quad (4.66)$$

де: μ_{3i} – псевдовипадкове число для визначення чинника $N_{A_n i}$ на певному i -тому циклі розрахунку.

Під час 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 порівнюють зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконують доти, доки буде виконана умова (4.65). Після завершення роботи програми на друк видаються такі дані: S_{II} на час початку локалізації, $\tau_{сл}$, $\tau_{лок}$, τ_2 , $\tau_л$, $S_{лок}$, $B_{\min}$, $N_{B_n}^I$, $N_{B_n}^3$, N_{A_n} , N_v , $N_{n.a}$, $N_{n.c}$, p .

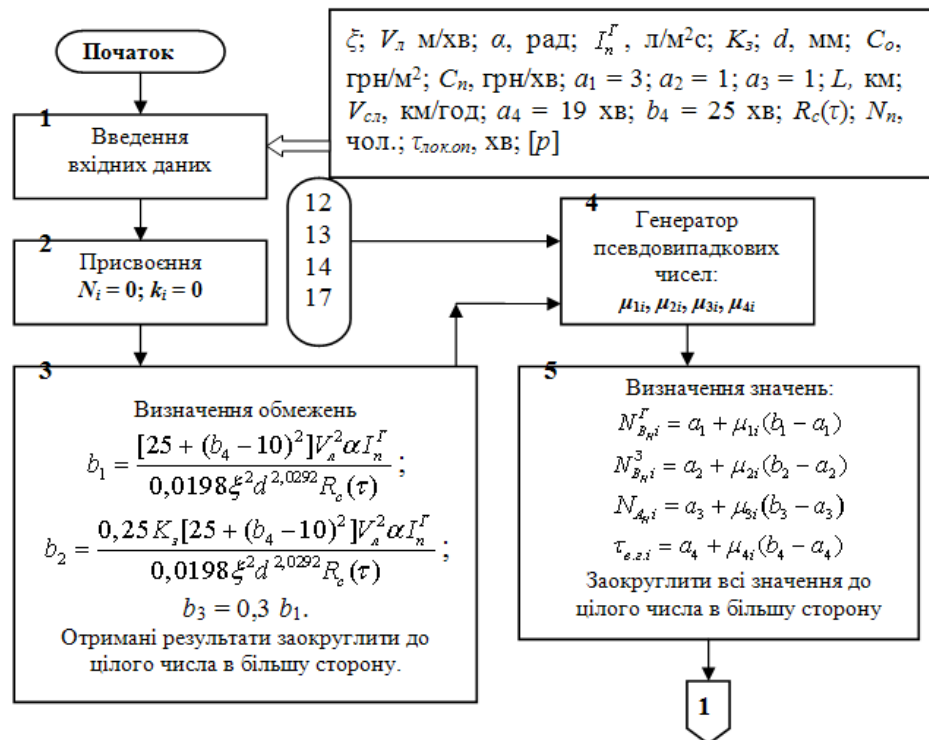


Рис. 4.5. Блок-схема алгоритму для введення вхідних даних, генерації псевдовипадкових чисел, визначення значень чинників обмежень (4.60)...(4.63)

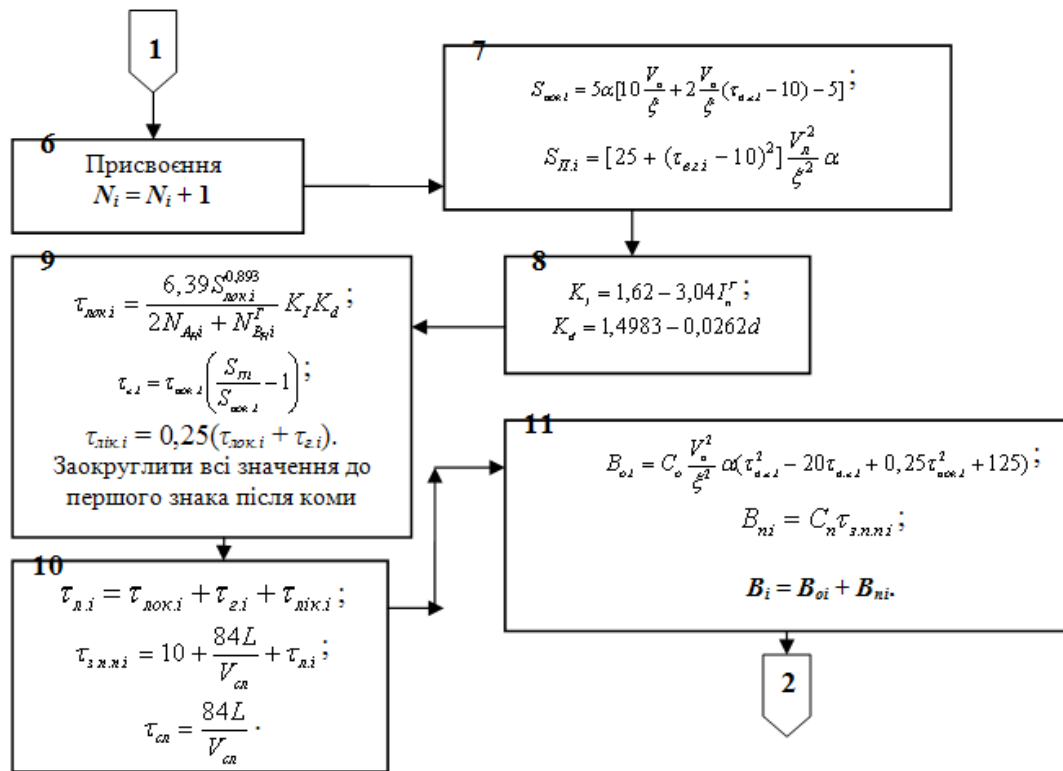


Рис. 4.6. Блок-схема алгоритму для визначення тривалості локалізації, гасіння та ліквідації пожежі і загальних втрат від пожежі

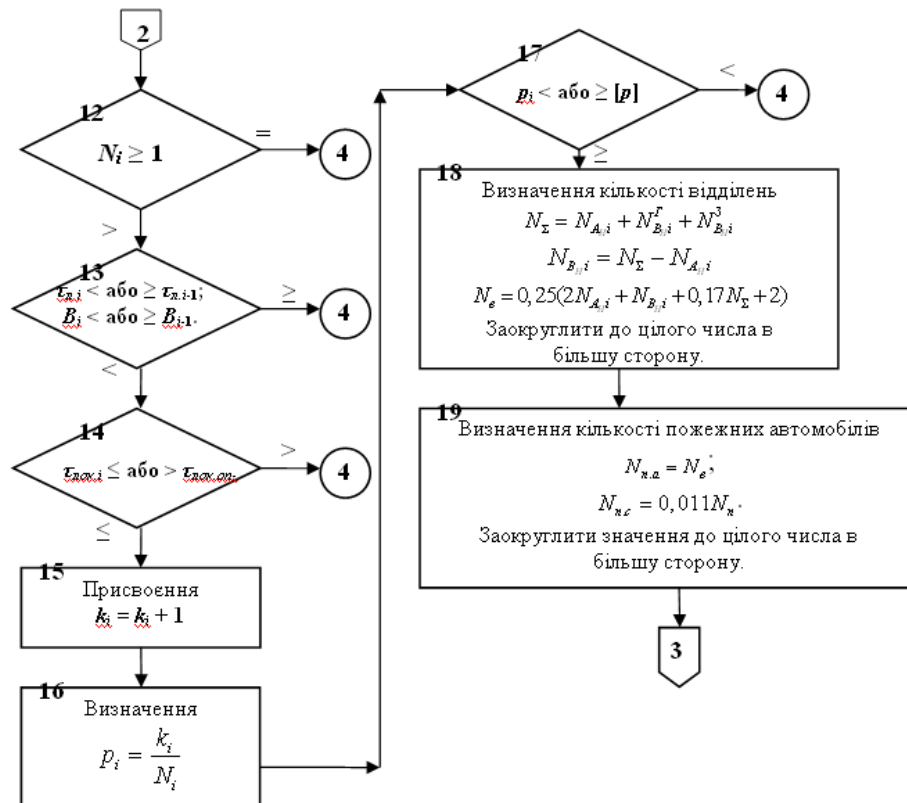


Рис. 4.7. Блок-схема алгоритму для визначення сил і засобів пожежогасіння

Блок-схему алгоритму для розв'язування оптимізаційної моделі зображено на рис. 4.5–4.8.

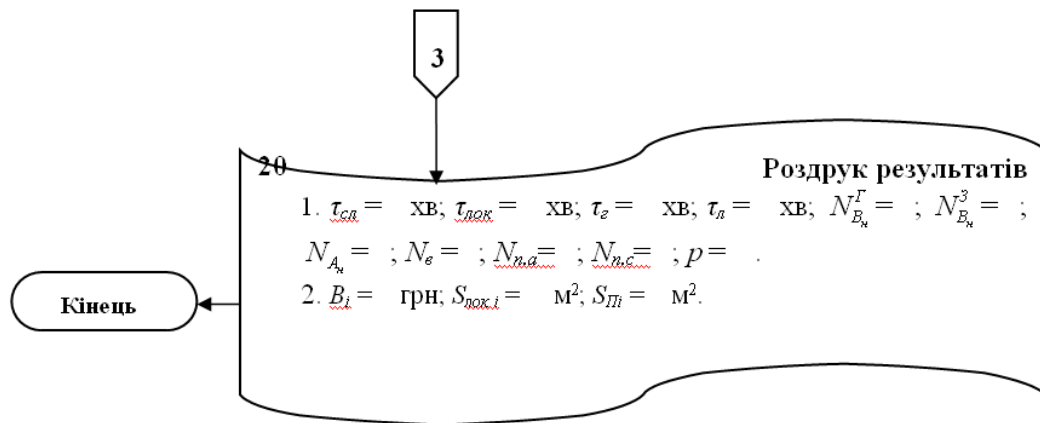


Рис. 4.8. Блок-схема алгоритму закінчення отримання визначених результатів та вказівка для їх роздруку

Лістинги пакета прикладних програм для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння, які написані на мові програмування С#, наведено в додатку А2 [127]. Роботу пакета прикладних програм продемонструємо на прикладі.

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/м²с; $K_3 = 2$; $d = 19$ мм; $C_o = 2500$ грн/м²; $C_n = 67$ грн/хв; $a_1 = 3$; $a_2 = 1$; $a_3 = 1$; $L = 1,5$ км; $V_{сл} = 32$ км/год; $a_4 = 19$ хв; $b_4 = 25$ хв; $R_c(\tau) = 0,8$; $N_n = 92$ ос.; $\tau_{лок,оп} = 40$ хв; $[p] = 0,5$.

Після введення вхідних даних отримали такі результати (рис. 4.9):

1. Час слідування $\tau_{сл} = 3,94$ хв;
- тривалість локалізації $\tau_{лок} = 36,8$ хв;
- тривалість гасіння $\tau_z = 9,3$ хв;
- тривалість ліквідації пожежі $\tau_n = 56,4$ хв;
- кількість стволів B для гасіння $N_{B_n}^I = 23$;
- кількість стволів B для захисту $N_{B_n}^3 = 8$;

кількість стволів A для гасіння $N_{A_n} = 6$;

кількість відділень $N_6 = 11$;

кількість пожежних автоцистерн для гасіння $N_{n,a} = 11$;

кількість спеціальних пожежників $N_{n,c} = 1$;

імовірність потрапляння точки в область допустимих розв'язків $p = 0,5$.

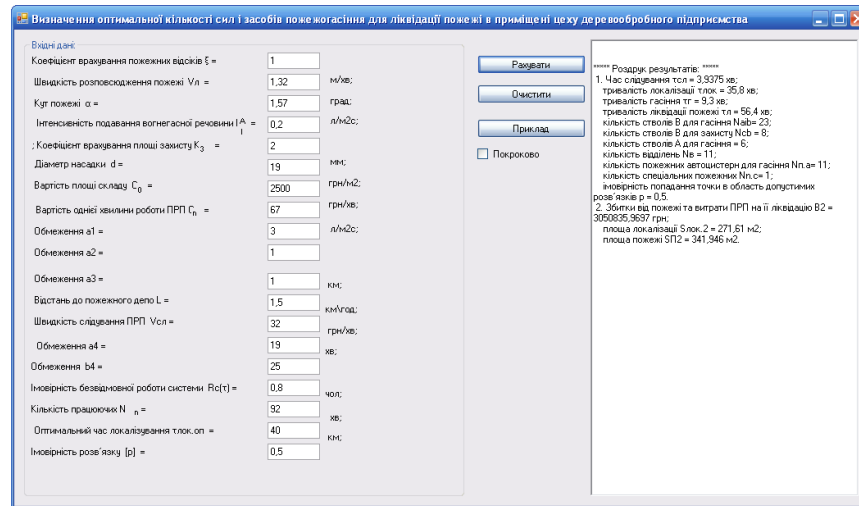


Рис. 4.9. Загальний вигляд робочого вікна програми для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння у приміщенні цеху деревообробного підприємства

2. Збитки від пожежі та витрати ПРП на її ліквідацію $B_2 = 3\,050\,835,97$ 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 розроблення математичних моделей для оптимізації сил і засобів ліквідації пожеж на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів в науці ще не розглядали. Утім, вчені аналізували час гасіння пожежі залежно від кількості одиниць відповідних приладів для її гасіння [164, 200].

Основною і найпоширенішою речовиною, яку використовують для гасіння пожеж на лісоскладах, є вода. Використання води із змочувачами значно підвищує ефективність гасіння. У ролі змочувачів, як правило, використовують різні піноутворювачі в кількості до 4%.

Найбільшого ефекту при локалізації та гасінні пожеж на лісоскладах досягають при застосуванні розчинів бентоніту і бішофіту, а також швидкотвердіючої піни (ШТП) [200]. Крім того, ШТП має властивість, що вода, яка використовується для її приготування, практично повністю залишається в зазначеному захисному шарі. Але ШТП рекомендують застосовувати як засіб першої атаки з подальшим використанням води для кінцевого гасіння.

На лісоскладах потрібно створювати спеціальні протипожежні пункти, на яких зберігати вогнегасні речовини, основну і спеціальну пожежну техніку, запаси рукавів, пересувні лафетні вишки типу ПЛВ-6-17, ПЛВ-7-20 та пожежні всюдиходи (наприклад типів ПВ-120 або ВП-60). Також на лісоскладах рекомендують встановлювати стаціонарні гідромонітори. Наприклад, один гідромонітор типу ГМН-250С може гасити пожежу на території лісоскладу площею до 4,5 га. Для гасіння пожежі у мертвій зоні гідромонітора важливо передбачати гребінки з головками для приєднання пожежних рукавів.

Гасіння пожежі на лісоскладах головно виконують 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.

Перш ніж перейти до розгляду оптимізації сил і засобів ліквідації пожежі на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів розглянемо особливості визначення площі пожежі $S_{П}$, площі локалізації пожежі $S_{лок}$, тривалості локалізації $\tau_{лок}$ і кількості відділень N_{ϕ} .

Площа пожежі $S_{П}$ – це площа, яка відповідає проекції зони горіння на горизонтальну площину. До площі пожежі зараховують також площу

розривів між штабелями у тому випадку, коли ці розриви не перешкоджають горінню для конкретного виду пожежного навантаження. Відповідно до цього положення спочатку визначаємо площу пожежі S_{II} , а потім кількість штабелів n , яка охоплена пожежею за час $\tau_{6,z}$ вільного горіння

$$S_{II} = [25 + (\tau_{6,z} - 10)^2] V_{II}^2 \alpha; \quad (4.67)$$

$$n = \frac{[25 + (\tau_{6,z} - 10)^2] V_{II}^2 \alpha}{(b + b_n)(l + b_{non})}, \quad (4.68)$$

де значення n заокруглити до цілого числа в більшу сторону;

V_{II} – найбільш вірогідна швидкість розповсюдження полум'я по штабелю з урахуванням швидкості вітру, м/хв;

$$V_{II} = V_l K_g K_\alpha; \quad (4.69)$$

K_g – коефіцієнт, який враховує вплив швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я по штабелю

$$K_g = 0,9912 \exp(0,0388 V_g); \quad (4.70)$$

V_g – швидкість вітру, м/с; K_α – коефіцієнт, який враховує вплив напрямку дії вектора швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я по штабелю

$$K_\alpha = -5 \cdot 10^{-5} \alpha_g^2 + 0,0123 \alpha_g + 0,374; \quad (4.71)$$

α_g – кут напрямку вітру (при $\alpha_g = 90^\circ$ розглядається попутний напрям вітру, який збігається з поздовжнім 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 кварталу попутний напрям вітру необхідно розглядати з тієї з чотирьох сторін кварталу, на якій виникла пожежа; при виникненні пожежі в центрі кварталу потрібно розглядати тільки попутний напрям вітру), град.;

b – ширина штабеля, м;

l – довжина штабеля, м;

b_n – ширина поздовжніх 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

$$S_{лок} = l_{\phi} (h + h_{лок}), \quad (4.72)$$

де l_{ϕ} – довжина (периметр) фронту пожежі, м;

$$l_{\phi} = 2(b + l + b_n + b_{non})n; \quad (4.73)$$

h – висота штабеля, м; $h_{лок}$ – глибина подачі вогнегасної речовини, м ($h_{лок} = 5$ м).

Тоді в кінцевому варіанті площа локалізації буде

$$S_{лок} = 2(b + l + b_n + b_{non})(h + 5)n. \quad (4.74)$$

Час тривалості локалізації визначаємо з використанням залежності
(4.6)

$$\tau_{лок} = \frac{6,39[2(b + l + b_n + b_{non})(h + 5)n]^{0,893}}{17,6N_{A_H} \cdot N_{Л_H} + N_{B_H}^{\Gamma}} K_I K_d, \quad (4.75)$$

де $N_{Лн}$ – загальна кількість лафетних стволів.

Кількість відділень визначаємо з урахуванням залежності (4.10) і з використанням додатково лафетних стволів

$$N_{\epsilon} = 0,25(2N_{Лн} + 2N_{Ан} + N_{Вн} + 0,17N_{\Sigma} + 2), \quad (4.76)$$

де N_{Σ} – загальна кількість стволів

$$N_{\Sigma} = N_{Лн} + N_{Ан} + N_{Вн}^{\Gamma} + N_{Вн}^3. \quad (4.77)$$

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

$$\tau_{л.і} \Rightarrow \min; \quad (4.78)$$

за критерієм

$$B_{o.і} + B_{n.і} \Rightarrow B_{\min}; \quad (4.79)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq N_{Внi}^{\Gamma} \leq b_1; \quad (4.80)$$

$$a_2 \leq N_{Внi}^3 \leq b_2; \quad (4.81)$$

$$a_3 \leq N_{Анi} \leq b_3; \quad (4.82)$$

$$a_4 \leq N_{Лнi} \leq b_4; \quad (4.83)$$

$$a_5 \leq \tau_{\epsilon.з.і} \leq b_5; \quad (4.84)$$

$$\tau_{лок.i} \leq \tau_{лок.оп}; \quad (4.85)$$

$$p_i \geq [p], \quad (4.86)$$

де a_1, a_2, a_3, a_4 – мінімальні значення обмежень, тобто наявна кількість 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

$$b_4 = N_{лн} = \frac{S_{\Pi} I_n^{\Gamma}}{Q_B R_c(\tau)}; \quad (4.87)$$

$N_{лн}$ – максимальна кількість лафетних стволів для ліквідації пожежі; $I_n^{\Gamma} = 0,45$ л/м²с (на штабелі пиломатеріалів); $I_n^{\Gamma} = 0,35$ л/м²с (на штабелі круглих лісоматеріалів); $Q_B = 65$ л/с;

b_5 – максимальне значення часу вільного горіння; $b_5 = 25$ хв; p – імовірність потрапляння досліджуваної i -ї 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 від площі пожежі S_{Π} . Тому в цьому випадку

$$\tau_z = \tau_{лок} \frac{S_{\Pi}}{S_{лок}}. \quad (4.88)$$

Блок-схему алгоритму для розв'язування оптимізаційної моделі з використанням методу Монте-Карло зображено на рис. 4.10...4.13. Лістинги пакета прикладних програм для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння наведено в додатку А3 [128]. Роботу пакета 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; $V_g = 4$ м/с; $\alpha_g = 45$ град; $b = 6$ м; $l = 6,5$ м; $h = 6$ м; $b_n = 16$ м; $b_{non} = 6$ м; $\alpha = 1,57$ рад; $I_n^r = 0,35$ л/м²с; $K_s = 2$; $d = 32$ мм; $C_o = 1440$ грн/м² [190, 197]; $C_n = 67$ грн/хв; $a_1 = 2$; $a_2 = 1$; $a_3 = 1$; $a_4 = 1$; $L = 1,5$ км; $V_{cl} = 32$ км/год; $a_5 = 19$ хв; $b_5 = 25$ хв; $R_c(\tau) = 0,8$; $N_n = 16$ чол; $\tau_{лок.оп} = 24$ хв; $[p] = 0,5$.

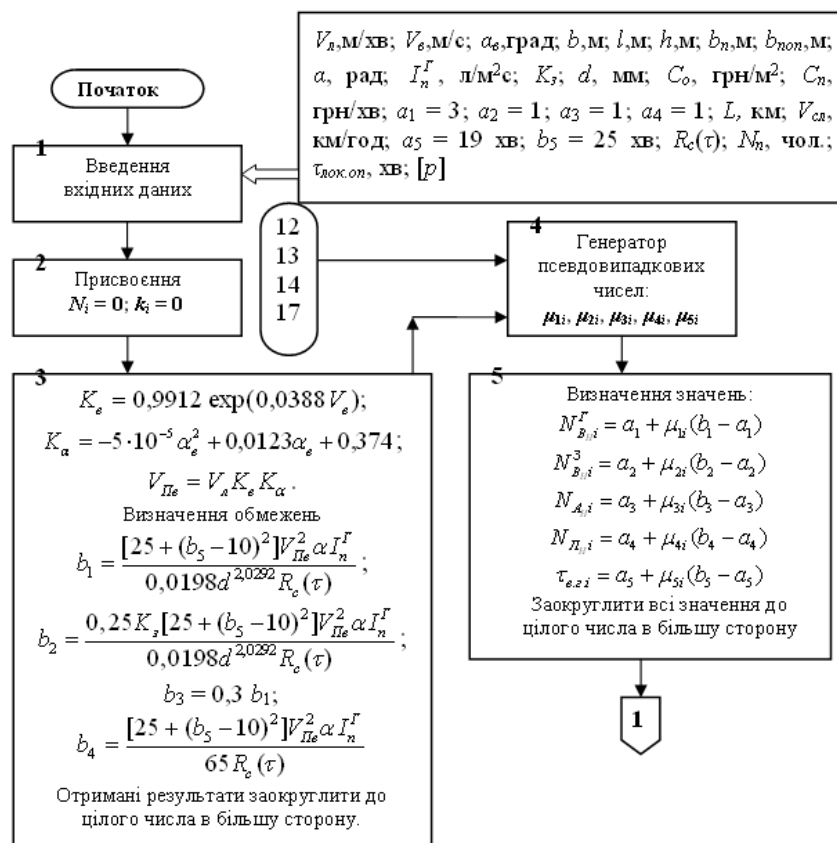


Рис. 4.10. Блок-схема алгоритму для введення вхідних даних, генерації псевдовипадкових чисел, визначення значень чинників обмежень (4.80)...(4.85)

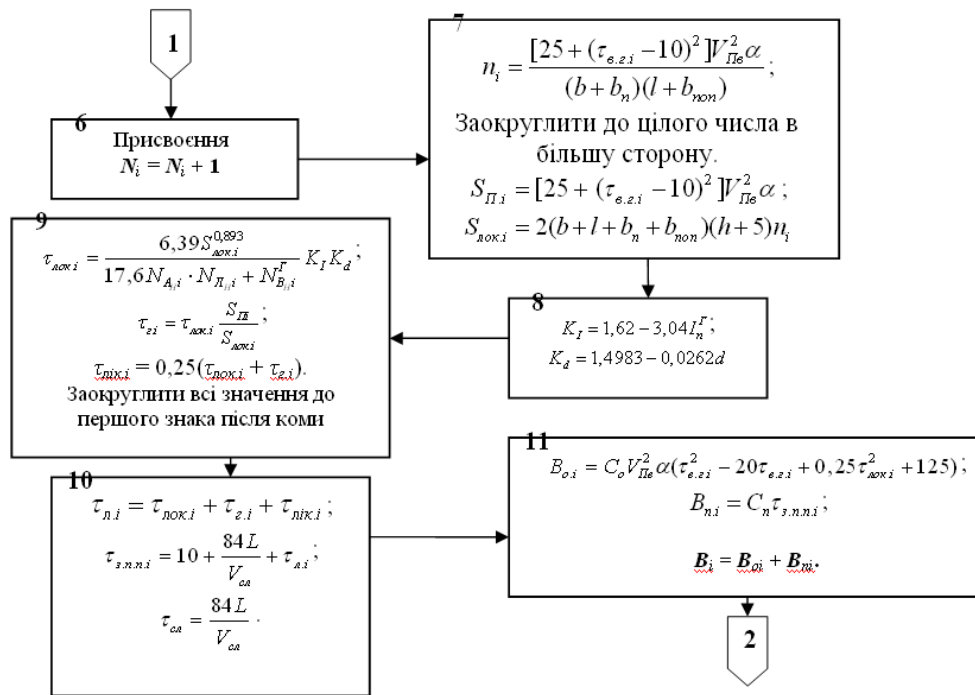


Рис. 4.11. Блок-схема алгоритму для визначення тривалості локалізації, гасіння та ліквідації пожежі і загальних втрат від пожежі

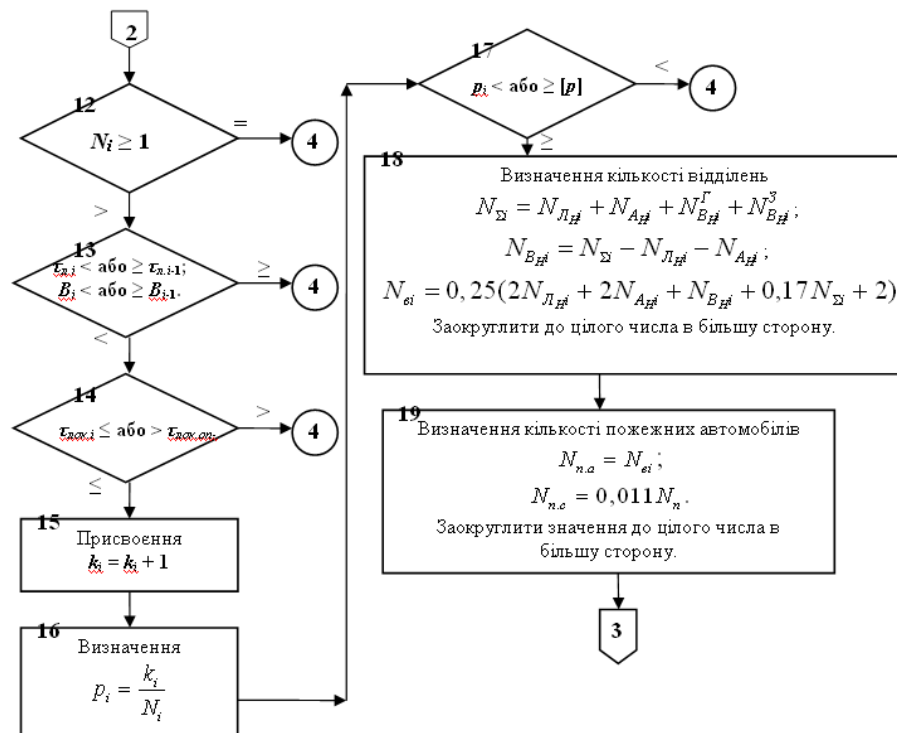


Рис. 4.12. Блок-схема алгоритму для визначення сил і засобів пожежогасіння

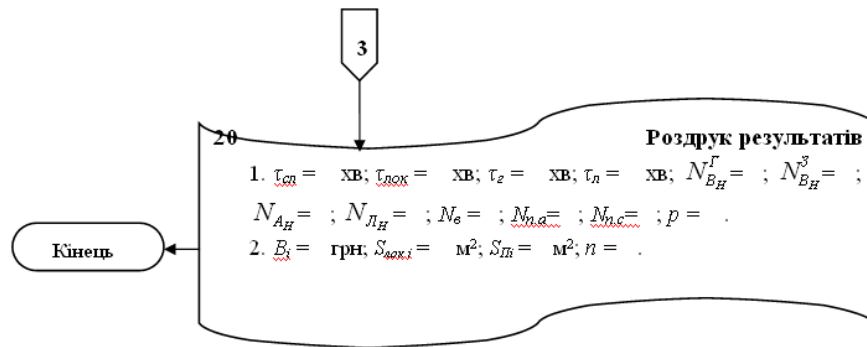


Рис. 4.13. Блок-схема алгоритму закінчення отримання визначених результатів та вказівка для їх роздруку

Результат, отриманий після введення вхідних даних, зображено на рис. 4.9.

Вхідні дані:

Швидкість розповсюдження пожежі $V_{л}$ =	3,51	м/хв;
Швидкість вітру $V_{в}$ =	4	м/с;
Кут напрямку вітру $\alpha_{в}$ =	45	град;
Ширина штабеля b =	6	м;
Довжина штабеля l =	6,5	м;
Висота штабеля h =	6	м;
Ширина позадоровного проїзду складу $b_{п}$ =	16	м;
Ширина поперечного проїзду складу $b_{поп}$ =	6	м;
Кут пожежі α =	1,57	рад;
Інтенсивність подавання вогнегасної речовини I_A =	0,35	л/м2с;
Коефіцієнт врахування площі захисту K_z =	2	
Діаметр насадки d =	32	мм;
Вартість площі складу C_0 =	1440	грн/м2;
Вартість однієї хвилини роботи ПРП C_n =	67	грн/хв;
Обмеження a_1 =	2	
Обмеження a_2 =	1	
Обмеження a_3 =	1	
Обмеження a_4 =	1	
Відстань до пожежного депо L =	1,5	км;
Швидкість слідування ПРП $V_{сл}$ =	32	км/год;
Обмеження a_5 =	19	
Обмеження b_5 =	25	
Імовірність безвідмовної роботи системи $R_c(t)$ =	0,8	
Кількість працюючих N =	16	чол;
Оптимальний час локалізування $t_{лок,оп}$ =	16	хв;
Імовірність розв'язку $[p]$ =	0,5	

Результати

1. Час слідування $t_{сл} = 3,94$ хв;
 тривалість локалізації $t_{лок} = 8,669$ хв;
 тривалість гасіння $t_{г} = 3,057$ хв;
 тривалість ліквідації пожежі $t_{л} = 14,63$ хв;
 кількість стовпів В для гасіння = 12
 кількість стовпів А для захисту = 8
 кількість стовпів А для гасіння = 7
 кількість лафетних стовпів для гасіння = 8
 кількість відділень $N_{в} = 15$
 кількість пожежних автоцистерн для гасіння $N_{п.а} = 15$
 кількість спеціальних пожежних $N_{п.с} = 1$
 імовірність попадання точки в область допустимих розв'язків $p = 0,5$

1.2. Збитки від пожежі та витрати ПРП на її ліквідацію $B_2 = 5437860$ грн;
 площа локалізації $S_{лок, 2} = 9867$ м2;
 площа пожежі $S_{П2} = 3479,64$ м2;
 кількість штабелів, які охоплені пожежею $n_2 = 13$ м2;

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 $t_{сл} = 3,94$ хв;

тривалість локалізації $t_{лок} = 8,67$ хв;

тривалість гасіння $\tau_e = 3,06$ хв;

тривалість ліквідації пожежі $\tau_l = 14,63$ хв;

кількість стволів B для гасіння $N_{B_H}^I = 12$;

кількість стволів B для захисту $N_{B_H}^3 = 8$;

кількість стволів A для гасіння $N_{A_H} = 7$;

кількість лафетних стволів для гасіння $N_{L_H} = 8$;

кількість відділень $N_e = 15$;

кількість пожежних автоцистерн для гасіння $N_{n.a} = 15$;

кількість спеціальних пожежників $N_{n.c} = 1$;

імовірність потрапляння точки в область допустимих розв'язків $p = 0,5$.

2. Збитки від пожежі та витрати ПРП на її ліквідацію $B_2 = 5\,497\,860$ грн;

площа локалізації $S_{лок.2} = 9867$ м²;

площа пожежі $S_{П2} = 3479,64$ м²;

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 приміщенні цеху

Дослідження процесу ліквідації пожежі виконуємо з використанням програми для визначення сил і засобів для ліквідації пожежі в приміщенні цеху та за даними прикладу, наведеного в параграфі 4.4.1, для якого приймаємо головні змінні чинники цього процесу, що впливають на площу пожежі і локалізацію та на кількість приладів пожежогасіння і залучених відділень ПРП, а саме: відсутність або наявність у приміщенні цеху

пожежних відсіків, яка враховується коефіцієнтом ξ ; лінійна швидкість розповсюдження фронту пожежі V_L ; тип пожежі (кругова, кутова), яка характеризується коефіцієнтом α ; 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 – $\xi = 1,8$.

Аналіз результатів досліджень (рис. 4.10) з використанням віртуальної системи для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння в цеху деревообробного підприємства показує, що за наявності пожежних відсіків лінійна швидкість розповсюдження фронту пожежі зменшується і це зменшує площу пожежі та локалізації.

Наприклад, за відсутності пожежних відсіків площа пожежі становила $S_{II} = 341,95 \text{ м}^2$, площа локалізації $S_{лок} = 271,61 \text{ м}^2$, за наявності пожежних відсіків ці площі зменшились відповідно у 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 підтверджують аналітичні розрахунки.

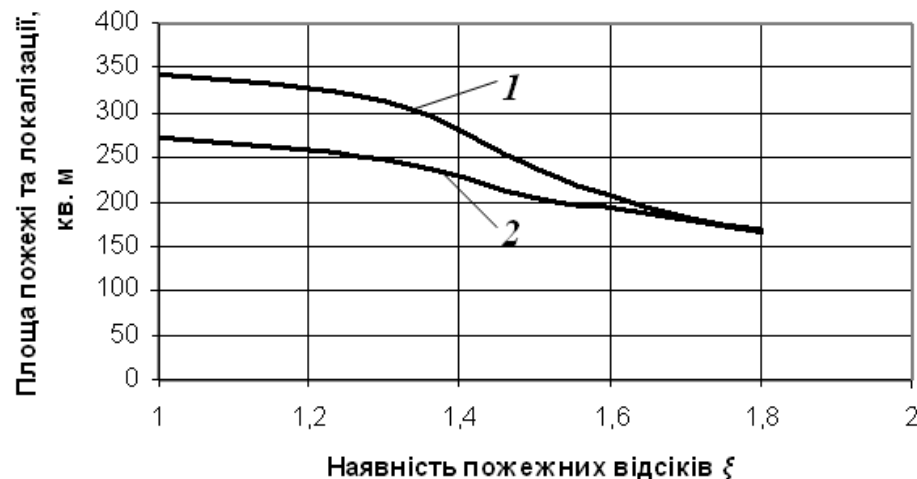


Рис. 4.10. Вплив наявності пожежних відсіків на величину площі пожежі та площі локалізації: 1 – площа пожежі S_{II} ; 2 – площа локалізації

2. Вплив лінійної швидкості розповсюдження фронту пожежі V_L на площу пожежі і площу локалізації (рис. 4.11).



Рис. 4.11. Вплив лінійної швидкості розповсюдження фронту пожежі $V_{\text{л}}$ на:
1 – площу пожежі; 2 – площу локалізації

Лінійна швидкість поширення фронту пожежі $V_{\text{л}}$ передусім залежить від виду і кількості пожежного навантаження. Так зі зміною $V_{\text{л}}$ від 0,8 м/хв до 1,5 м/хв, тобто в 1,9 разу, площа пожежі збільшується у 2,2 разу, а площа локалізації – в 1,7 разу. Виходячи з цього висновку можна зауважити, що для зменшення площі пожежі і локалізації насамперед потрібно в деревообробних цехах облаштовувати протипожежні відсіки, які значно зменшують лінійну швидкість розповсюдження фронту пожежі.

3. Вплив типу пожежі (кругова, кутова) на площу пожежі і локалізацію.

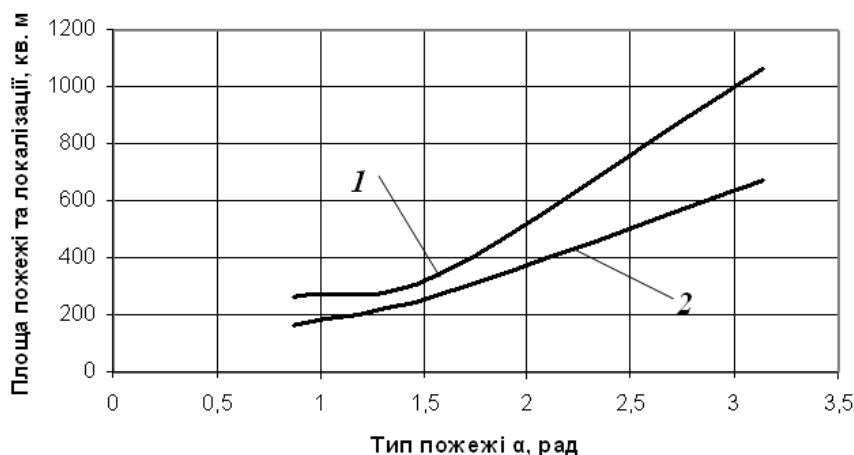


Рис. 4.12. Вплив типу пожежі на:
1 – площу пожежі; 2 – площу локалізації

На виникнення того чи іншого типу пожежі (кругова 360° або кутова 180° чи 90°) 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 електросистеми тощо.

Найбільша площа пожежі виникає при її круговому типі (рис. 4.12). Площа кругової пожежі приблизно вчетверо більша за площу кутової (90°). Тому необхідно передусім 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.

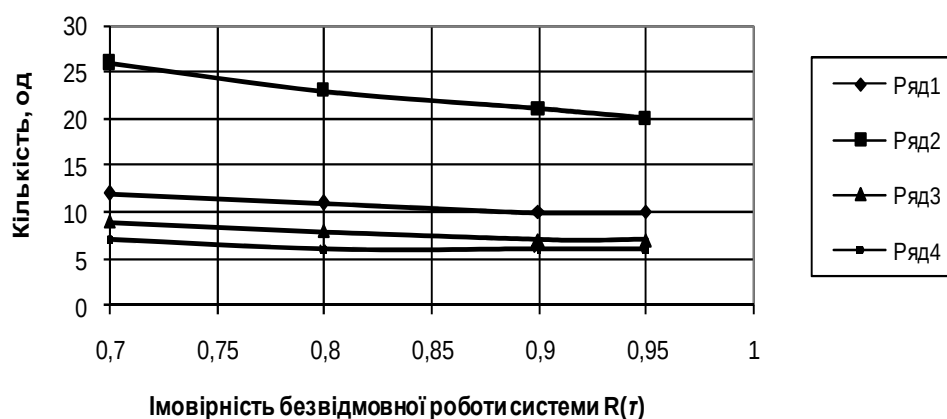


Рис. 4.13. Вплив надійності системи пожежогасіння на кількість пожежно-рятувальних відділень та приладів для гасіння пожежі: ряд 1 – пожежно-рятувальні відділення; ряд 2 – ручні стволи В для гасіння; ряд 3 – ручні стволи В для захисту; ряд 4 – ручні стволи А для гасіння

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 разу, а кількість стволів В на гасіння пожежі – в 1,3 разу. Відповідно зменшується кількість стволів А на гасіння і стволів В на захист. Тобто можна зробити висновок, що імовірність безвідмовної роботи всієї системи пожежогасіння істотно впливає на

загальну кількість залучення сил і засобів для ліквідації пожежі, тож цей чинник необхідно враховувати для кожного випадку ліквідації пожежі.

4.5.2 Дослідження при ліквідації пожежі на відкритих складах

Процес ліквідації пожежі на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів досліджуємо, використовуючи програму 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_v ; напрям вітру (кут напрямку вітру α_v); тип пожежі (кругова, кутова), яка характеризується коефіцієнтом α ; 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 $S_{л}$.

Аналіз впливу лінійної швидкості розповсюдження фронту пожежі V_l на площу локалізації $S_{лок}$ і площу пожежі $S_{л}$ 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 $S_{л}$ збільшуються.

Отриманий результат підтверджується результатами теоретичних та експериментальних досліджень. Крім цього, підтверджено той факт, що в процесі ліквідації пожежі на складах штабельного зберігання лісоматеріалів площа локалізації більша за площу пожежі приблизно у 3,4 разу. Це пояснюється тим, що площа локалізації розміщується по периметру штабелів, які охоплені пожежею, а площа пожежі визначається як проекція площі горіння на площу основи розміщення штабелів.

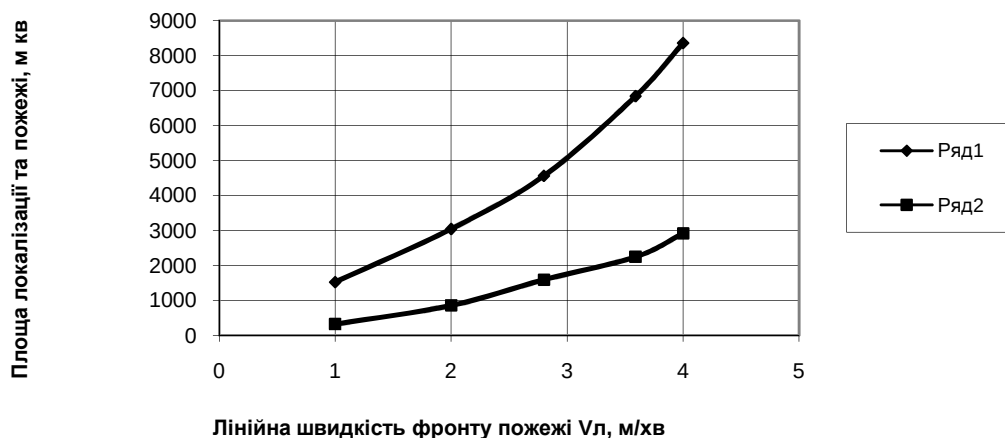


Рис. 4.14. Вплив лінійної швидкості фронту пожежі при попутно-бічному вітрі $V_{\text{в}} = 4$ м/с на: площу локалізації – ряд 1; площу пожежі – ряд 2

Результати аналізу пожежі на лісоскладі показали, що при збільшенні лінійної швидкості фронту пожежі вчетверо кількість штабелів, які охоплені пожежею, збільшується у 5...6 разів (рис. 4.15).

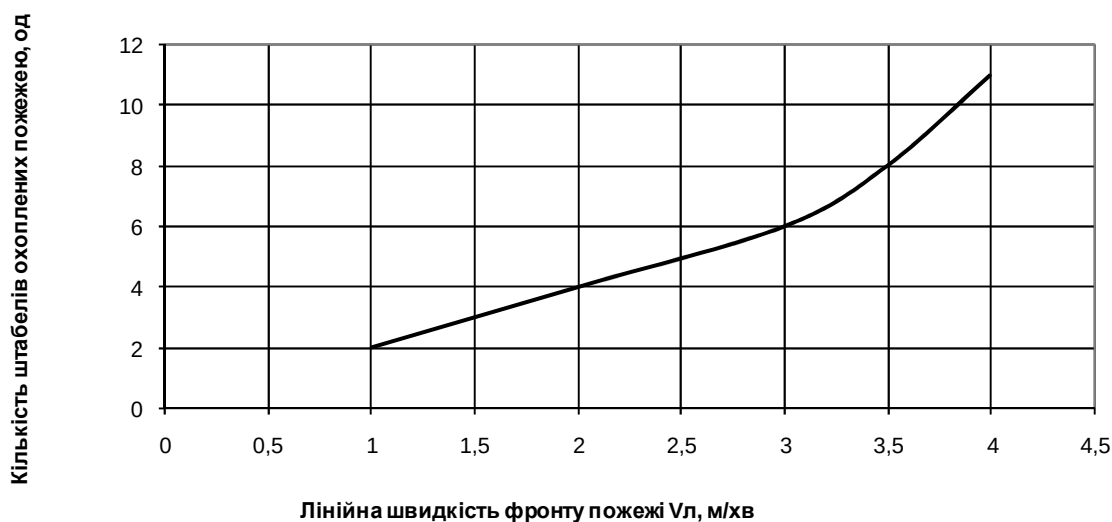


Рис. 4.15. Вплив лінійної швидкості фронту пожежі при попутно-бічному вітрі $V_{\text{в}} = 4$ м/с на кількість штабелів, охоплених пожежею

У зв'язку із цим потрібно при розміщенні відкритих складів лісоматеріалів враховувати троянду вітрів, щоб переважальний вітер був

спрямований не на склад, а зі складу. Це дозволить значно зменшувати лінійну швидкість фронту пожежі.

2. Вплив швидкості вітру V_v 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 ($\alpha_v = 45^\circ$) учетверо (рис. 4.16) площа локалізації за той же час збільшується приблизно в 2,1 разу, а площа пожежі – у 2,15 разу. Такі результати можна пояснити тим, що збільшується лінійна швидкість фронту пожежі.

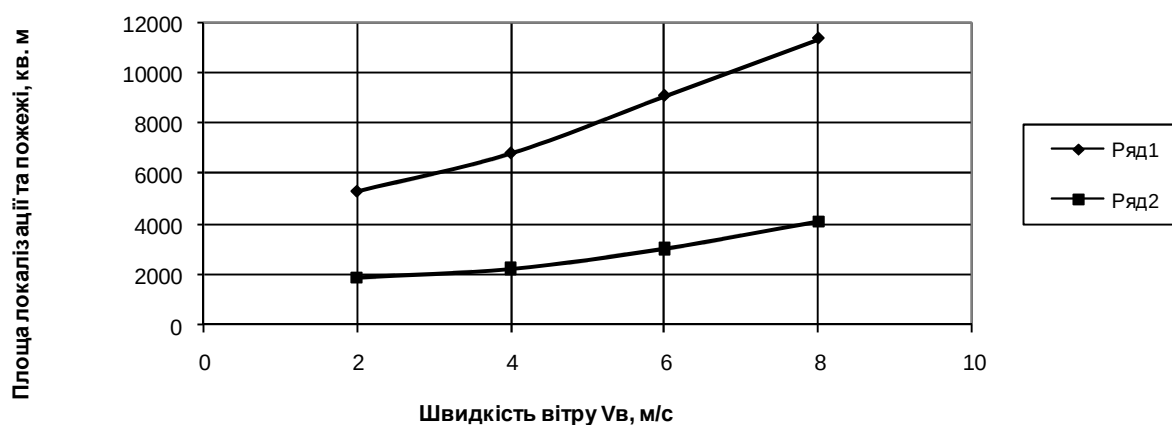


Рис. 4.16. Вплив швидкості вітру на площу локалізації (ряд 1) і площу пожежі (ряд 2)

Зі збільшенням площі пожежі збільшується кількість штабелів, яка охоплюється пожежею. Наприклад, при збільшенні швидкості вітру вчетверо площа пожежі збільшується у 2,15 разу, а кількість штабелів (рис. 4.17), що знаходяться в зоні пожежі, збільшується приблизно удвічі.

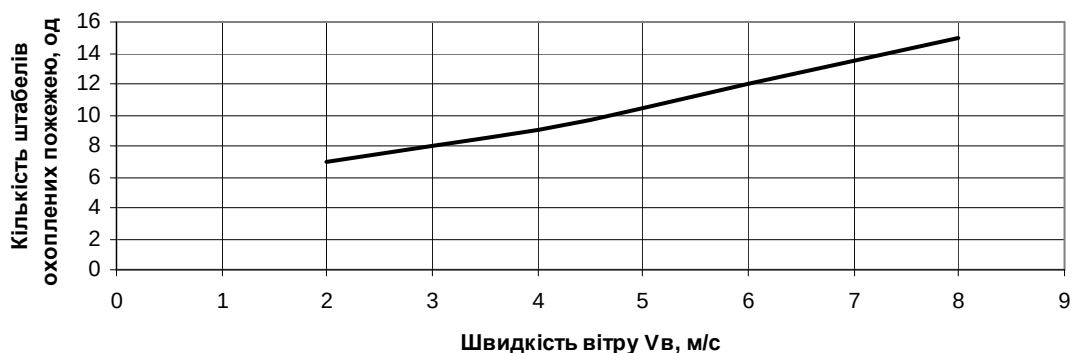


Рис. 4.17. Вплив швидкості вітру на кількість штабелів, охоплених пожежею

3. Вплив напрямку вітру α_v на площу локалізації $S_{лок}$, площу пожежі $S_{п}$ та на кількість штабелів, які охоплені пожежею.

Для аналізу було розглянуто такі напрямки вітру: $\alpha_v = 45^\circ$ (боковий попутний вітер); $\alpha_v = 90^\circ$ (попутний вітер); $\alpha_v = 270^\circ$ (зустрічний вітер). Дослідження виконували при $V_d = 3,51$ м/хв і $V_v = 4$ м/с. Результати досліджень зображено на рис. 4.18 і 4.19.

Аналіз отриманих результатів дослідження показує, що найбільша площа локалізації і пожежі відповідає попутному напрямку вітру ($\alpha_v = 90^\circ$) (рис. 4.18), а найменші площі відповідають зустрічному напрямку вітру.

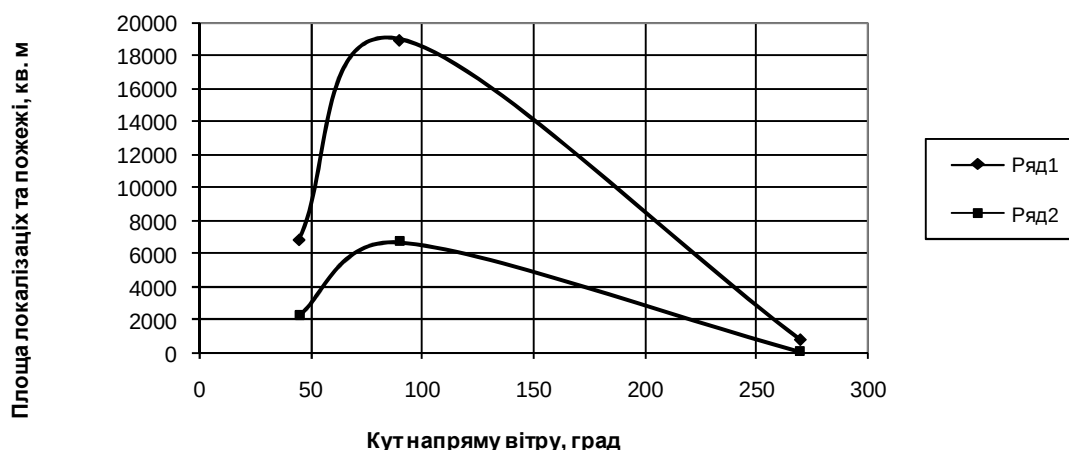


Рис. 4.18. Вплив напрямку вітру на площу локалізації (ряд 1) і площу пожежі (ряд 2)

Наприклад, площа локалізації при зустрічному напрямку вітру у порівнянні з попутним зменшується майже у 25 разів, а площа пожежі – у 170 разів.

Зменшення площі пожежі від зустрічного напрямку вітру приводить 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.

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 тим, які отримано в підсумку дослідження виникнення пожеж у деревообробних цехах.

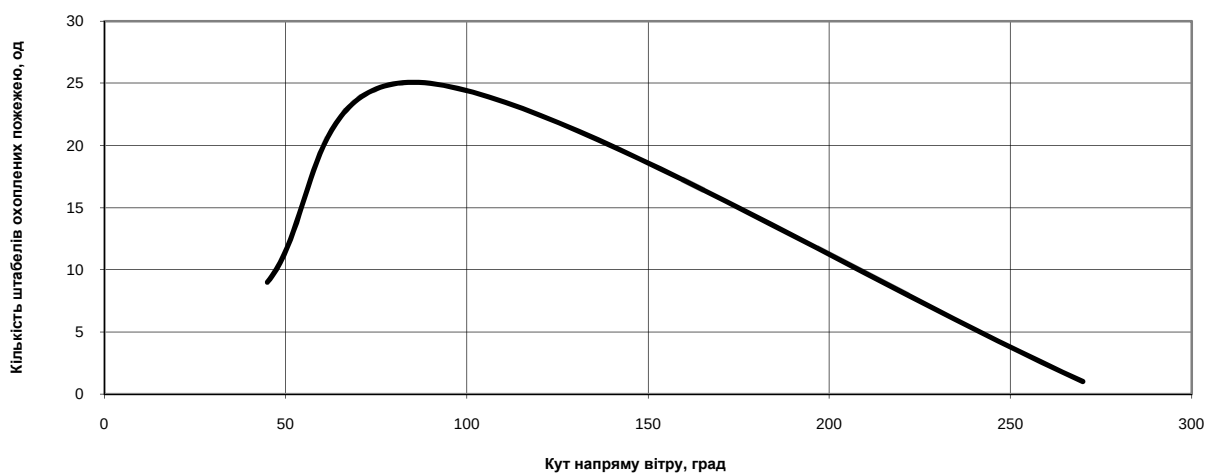


Рис. 4.19. Вплив напрямку вітру на кількість штабелів, охоплених пожежею

4.5.3 Аналіз отриманих результатів

Для аналізу отриманих результатів досліджень скористаємося результатами ліквідації пожежі на деревообробному підприємстві «Клен»

[183], яка трапилася 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 локалізували о 16 год 30 хв, а ліквідували о 19 год 30 хв. Тривалість вільного горіння становила 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 36 х 72 м. Загальний вид цеху в період ліквідації пожежі зображено на рис. 4.20.

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 ділянки і цеху (верстати, майно, документація) та 220 м³ деревини.



Рис. 4.20. Загальний вид цеху деревообробного підприємства «Клен» в період ліквідації пожежі



Рис. 4.21. Фрагмент ліквідації пожежі на деревообробному підприємстві «Клен»

Результати ліквідації пожежі на деревообробному підприємстві «Клен» аналізуємо за допомогою віртуальної системи (програми) для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі у приміщенні цеху деревообробного підприємства.

На першому етапі для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі у приміщенні цеху деревообробного підприємства «Клен» вводимо в систему такі вхідні дані: $\xi = 1$; $V_l = 1,2$ м/хв; $\alpha = 0,875$ рад; $I_n^r = 0,2$ л/м²с; $K_3 = 2$; $d = 19$ мм; $C_o = 1800$ грн/м²; $C_n = 67$ 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 такі результати:

1. Час слідування $\tau_{cl} = 20,5$ хв;
 тривалість локалізації $\tau_{лок} = 19,5$ хв;
 тривалість гасіння $\tau_e = 26,1$ хв;
 тривалість ліквідації пожежі $\tau_l = 57$ 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 $N_e = 16$;

кількість пожежних автоцистерн для гасіння $N_{n.a} = 16$;

кількість спеціальних пожежників $N_{n.c} = 1$;

імовірність потрапляння точки в область допустимих розв'язків $p = 0,9$.

2. Збитки від пожежі та витрати ПРП на її ліквідацію $B = 1\,147\,469,82$ грн;

площа локалізації $S_{лок.2} = 225,3$ м²;

площа пожежі $S_{ПГ} = 526,8$ м².

На другому етапі аналізуємо результати ліквідації пожежі:

1. На деревообробному підприємстві «Клен» в цеху, де виникла пожежа, немає пожежних відсіків, що сприяло вільному розповсюдженню пожежі і, відповідно, швидкому зростанню площі пожежі. Крім цього, у цеху відсутні засоби протипожежного захисту (пожежні сповіщувачі та оповіщувачі), що не дало змоги оперативно виявити пожежу та передати сповіщення про неї до ОДС ДСНС у Закарпатській області.

2. Отримавши повідомлення, ОДС не зреагувала на те, що пожежа виникла на деревообробному підприємстві і прислала тільки 5 відділень ПРЧ з м. Іршава і м. Виноградів, що виявилось замало для гасіння пожежі такого об'єкта (на початок роботи перших стволів площа пожежі становила 792 м²).

3. Через недостатню кількість 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 м³ деревини склали 4 249 640 грн, а витрати ПРП на ліквідацію пожежі – 20 196 грн.

5. Відповідно до рекомендацій віртуальної системи (програми) для визначення оптимальної кількості сил і засобів пожежогасіння для ліквідації пожежі на об'єкті «Клен» необхідно було скерувати туди 16 відділень ПРП

ДСНС у Закарпатській області, що дозволило б локалізувати пожежу за 19,5 хв, загасити – за 26,1 хв, кінцеве гасіння тривало б 11,4 хв, тобто загальна тривалість ліквідації пожежі не перевищувала б 57 хв. Крім того, тривалість вільного горіння була б зменшена на 10 хв, площа пожежі не перевищила до перших стволів 527 м². Відповідно збитки об'єкта не перевищили 1 141 605 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» (м. Костопіль) [182]; ТОВ «Лісокомбінат Дубове» (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 цеху деревообробного підприємства є надійним помічником у разі пожежі в закритих приміщеннях деревообробних підприємств.

Аналогічний аналіз пожеж було виконано 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.

Висновки

1. Аналіз наявних критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності дав змогу 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 насамперед 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 із врахуванням надійності кількість пожежної техніки необхідно збільшувати на 16,4%. При визначенні, наприклад, 10 стволів за наявною методикою, їх кількість необхідно збільшити на 2 стволи і відповідно кількість пожежників.

5. Вперше розроблено математичну модель, алгоритм і програму для ПЕОМ для 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. Аналогічно вперше розроблено математичну модель, алгоритм і програму для ПЕОМ для 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 розміщенні відкритих складів лісоматеріалів необхідно враховувати троянду вітрів і розміщувати квартали складів своєю довгою стороною перпендикулярно до вектора 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 відповідність дійсним процесам і рекомендуються для впровадження в ОДС та ПРЧ ДСНС України.

РОЗДІЛ 5

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ОЦІНКИ

ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

ДЛЯ ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

5.1 Вихідні положення

Під час будівництва деревообробних цехів, як і інших подібних об'єктів, всі конструктивні елементи споруд розраховують за всіма правилами будівельної механіки на десятки років, але при пожежі вони можуть бути зруйновані за декілька хвилин. 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 у приміщенні може досягти 965...980 °С, що може призвести до руйнування залізобетонних фермових конструкцій. Тому для оперативного початку локалізації та ліквідації пожежі необхідно знати межу вогнестійкості будівельних конструкцій цехів деревообробних підприємств, щоб ще до початку руйнування конструкції пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС змогли ліквідувати дію високих руйнівних температур, тобто щоб початок ліквідації пожежі був менший від межі вогнестійкості. Відповідно виникає необхідність надійно забезпечити вогнестійкість конструкцій на випадок виникнення пожежі та до її повної ліквідації.

Розглядаючи будівлі одноповерхових цехів деревообробних підприємств можна виділити такі головні будівельні конструкції. Основними несучими елементами є колони, на яких розміщуються підкроквяні залізобетонні ферми або балки та кроквяні ферми, за допомогою яких утворюється покрівля цеху. Для закриття покрівлі від зовнішнього середовища на кроквяних фермах розміщують залізобетонні ребристі плити

покриття, пароізоляцію, шар утеплювача, цементну стяжку та багатошаровий рубероїдний килим. Усе це покриття є навантаженням на кроквяні ферми, які, своєю чергою, передають це навантаження на підкроквяні залізобетонні елементи та колони.

За конструктивним оформленням покрівлі цехів можуть бути плоскими або скатними, що залежить від конструктивної форми кроквяних балок або ферм. Щодо колон і плоских підкроквяних, кроквяних балок або ферм вже є чимало експериментальних та теоретичних досліджень з вогнестійкості, що дозволяє забезпечувати їх залишкову міцність після ліквідації пожежі. У цьому напрямі важливий внесок зробили В. І. Агаджанов, Б. Г. Демчина, В. М. Жартовський, Н. А. Ільїн, С. В. Поздєєв, А. І. Яковлев, С. Л. Фомін та багато інших. Але стосовно вогнестійкості залізобетонних кроквяних сегментних, трапецієподібних та аркових ферм, які в більшості випадків використовуються для виготовлення скатних покрівель деревообробних цехів, результати наукових досліджень практично є на початковій стадії.

Для визначення межі вогнестійкості залізобетонної конструкції можна використовувати три підходи [84]. Перший підхід полягає у визначенні стандартного температурного режиму пожежі та у виборі згідно з ДБН В.1.1-7-2002 2 (табл. 4), залежно від ступеня вогнестійкості будівлі, необхідної мінімальної межі вогнестійкості конструкції. Другий підхід можна виконати з проведенням експериментальних вогневих досліджень за методикою ДСТУ Б В.1.1-4-98, за результатами яких можна визначити вогнестійкість конкретної конструкції. За третього підходу аналізують планувальні рішення приміщень, їх архітектурні особливості, пожежне навантаження та розраховують межу вогнестійкості із врахуванням сценарію розвитку реальної пожежі. Третій підхід до визначення межі вогнестійкості є складним, але точнішим, ніж перший, і не потребує значних витрат для проведення експериментальних досліджень.

Тому розглянемо визначення межі вогнестійкості залізобетонних кроквяних сегментних, трапецієподібних та аркових ферм скатних покрівель,

на яку впливають передусім пожежні ситуації (особливо місце виникнення пожежі) в закритих цехах деревообробних підприємств.

5.2 Вогнестійкість залізобетонних конструкцій скатних крівель

Для визначення вогнестійкості залізобетонних конструкцій існує низка методик та стандартів [84, 153, 185, 201, 263, 264]. Але для цього необхідно враховувати чинники, які впливають на розвиток пожежі у приміщеннях, де ці конструкції будуть застосовуватись. У працях [147, 148] наведено моделі розвитку пожежі і їх використання для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій. Зокрема, розглядається інтегральна, зонна модель пожежі та модель, яка базується на розв'язуванні повної системи рівнянь Нав'є-Стокса. Для приміщень, висота яких не перевищує лінійних розмірів підлоги, може бути використана зонна модель пожежі. Розглянута спільна модель динаміки зміни середньооб'ємної температури у приміщенні при пожежі та теплопровідності будівельних конструкцій з урахуванням тепло- та масообміну з навколишнім середовищем. Як показало порівняння цієї моделі з результатами натурних випробувань, вона може бути застосована для оцінки вогнестійкості в умовах реальної пожежі.

У роботі [225] розглянуто методи оцінки вогнестійкості та необхідної товщини вогнезахисного покриття для різних типів конструкцій. Вирішено завдання нестационарного прогріву конструкцій з вогнезахистом, в основу якого було покладено закон збереження маси, кількості руху й енергії, а також диференціальне рівняння переносу субстанції для бетону та вогнезахисних покриттів. Також розраховано несучу здатність конструкцій в умовах пожежі. Цей розрахунок є складним і виконується за допомогою ЕОМ.

Питанням вогнестійкості та залишкової міцності залізобетонних плит перекриття в умовах реальної пожежі присвячені роботи [204, 205]. Здійснені розрахунки залишкової міцності при пожежі в житловому приміщенні

тривалістю 40 хв, зокрема 30 хв вільного розвитку та 10 хв локалізації і гасіння, показали, що в зоні арматури температура досягає до 400 °С за температури на зовнішній поверхні плити – 798 °С, а її міцність зменшується на 10%. Бетон прогрівається на глибині 1 см до температури 550 °С, на глибині 2 см – до 400 °С, на 5 см – до 150 °С, на 11 см (половину товщини плити) – до 40 °С. Стиснута зона бетону не нагрівається до критичних температур при наведеному часі ліквідації пожежі. У цьому випадку умова міцності забезпечується.

Аналізуючи розглянуті публікації, можна констатувати, що питанням вогнестійкості залізобетонних кроквяних сегментних, трапецієподібних та аркових ферм скатних покрівель практично не приділялося уваги. Тому важливо розробити методологію визначення вогнестійкості та залишкової міцності залізобетонних кроквяних ферм для скатних покрівель в умовах реальної пожежі з урахуванням різних пожежних ситуацій.

Для реалізації цього завдання необхідно розв'язати такі задачі [45]:

- 1) визначити температуру середовища цеху в місці розміщення кроквяних ферм залежно від місця виникнення осередку пожежі;
- 2) визначити температуру на зовнішніх поверхнях залізобетонних кроквяних ферм залежно від температури середовища;
- 3) визначити критичну температуру в перерізах залізобетонних кроквяних ферм залежно від часу тривалості пожежі;
- 4) визначити міцність і відповідну вогнестійкість залізобетонних кроквяних ферм з урахуванням умов реальної пожежі.

Для розв'язування поставлених задач застосуємо конструкцію кроквяних залізобетонних ферм для скатних покрівель, які використані для опоряджувально-складального цеху деревообробного підприємства (м. Самбір Львівської області, вул. В. Чорновола, 36). Загальна площа його приміщень, як ми вже зазначали у другому розділі, – 14 256 м²; висота цеху до ферм – 6 м; об'єм приміщень до ферм – 85 536 м³; довжина цеху з кроком колон 6 м – 192 м; ширина цеху – 72 м; пожежне навантаження – 200 кг/м².

Огороджувальні конструкції стін між відділеннями – цегляні. Є шість евакуаційних виходів. Загальний вид цеху ми вже наводили на рис. 2.3, проте для зручності продублюємо його (рис. 5.1). Окрім того, наведемо поперечний переріз цеху (рис. 5.2).



Рис. 5.1. Зовнішній вид опоряджувально-складального цеху деревообробного підприємства (м. Самбір)

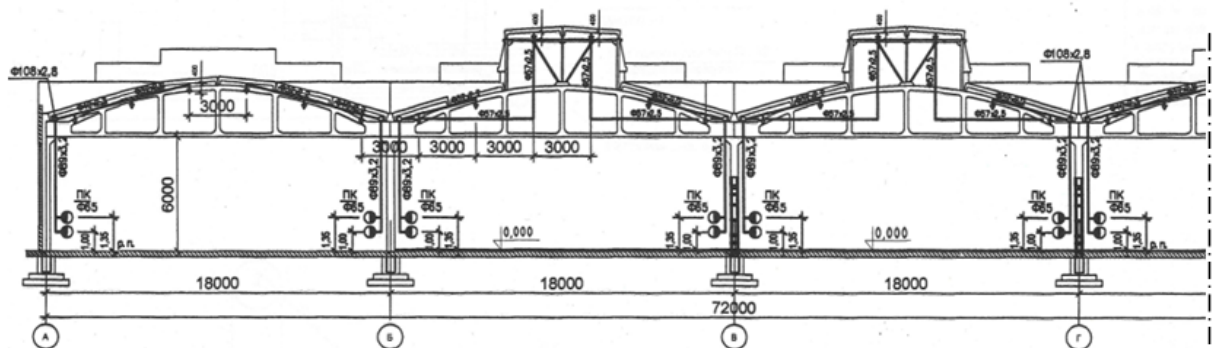


Рис. 5.2. Вид поперечного перерізу опоряджувально-складального цеху деревообробного підприємства (м. Самбір)

Розглянувши конструкцію покрівлі цеху (рис. 5.2), приймаємо для розроблення методу визначення вогнестійкості, а також залишкової міцності аркову безроскісну залізобетонну кроквяну ферму, яка використовується для перекриття прольоту шириною 18 000 мм. Загальний вид і розміри такої ферми, яку найчастіше використовують під час будівництва одноповерхових цехів, зображено на рис. 5.3. Аркові безроскісні залізобетонні ферми

виготовляють довжиною 17 940 мм і 23 940 мм відповідно для прольотів 18 000 мм і 24 000 мм. Висота арки відповідно до її довжини 3000 мм і 3300 мм і шириною (товщиною) 240 мм і 280 мм. Матеріал ферми – бетон на силікатній основі класу С32/40 (В40) з використанням стержневої арматури А800СК $d_n = 16$ мм згідно з ДСТУ 3760:2006.

Розміри перерізів конструктивних елементів аркової безроскісної залізобетонної ферми довжиною 17 940 мм зображено на рис. 5.4.

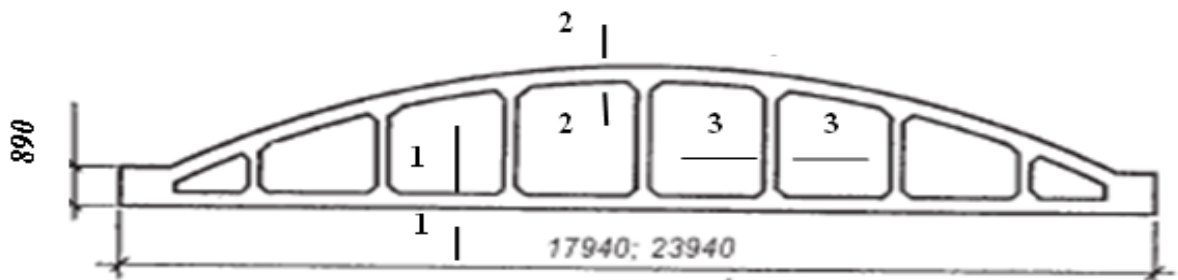


Рис. 5.3. Конструкція аркової залізобетонної (бетон класу С32/40) безроскісної ферми (маса 6,5 т)

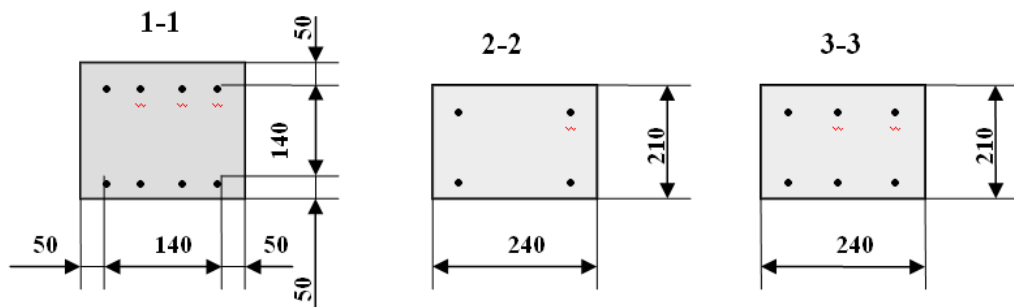


Рис. 5.4. Перерізи конструктивних елементів аркової безроскісної ферми (рис. 5.3): 1-1 – армування нижнього поясу арматурою А800СК $d_n = 16$ мм; 2-2 – армування арки арматурою А800СК $d_n = 16$ мм; 3-3 – армування стійки арматурою А800СК $d_n = 16$ мм

Прийнявши для розгляду конструктивний тип ферми, переходимо до розв'язання поставлених задач, тобто до розроблення методології визначення вогнестійкості та залишкової міцності залізобетонних кроквяних ферм для скатних покрівель в умовах реальної пожежі.

1. Визначення температури середовища цеху в місці розміщення кроквяних ферм залежно від місця виникнення осередку пожежі. У цьому випадку використаємо залежності, які рекомендовані в роботі [135], для визначення зростання середньої температури середовища T_m у приміщенні в конвективній колонці над осередком пожежі та для визначення температури $T(x,y)$ на певній відстані від осередку пожежі. Тоді

$$T_m = T_0 \cdot \exp\left(\frac{A}{B} \cdot \tau^n\right), K; \quad (5.1)$$

$$A = \frac{\pi}{3} \psi_n v_{\text{л}}^2; \quad B = \frac{c_p \rho_0 T_0 V_i}{\eta(1-\varphi) Q_{\text{н.р}}};$$

$$T(x,y) = T_m \cdot \left\{ \left[0,8 + 0,2 \left(\frac{y}{y_0} \right) \right] \left[1,33 - \left(\frac{x}{2x + x_0} \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (5.2)$$

де T_0 – температура у приміщенні до виникнення пожежі, К; τ – час пожежі, с; n – коефіцієнт, що враховує форму пожежі, при круговому розповсюдженні пожежі $n = 3$ [135]; ψ_n – питома швидкість вигорання (швидкість газифікації) горючого матеріалу, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; $v_{\text{л}}$ – лінійна швидкість розповсюдження полум'я, м/с; c_p – ізобарна теплоємність газового середовища у приміщенні ($c_p \approx 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$); ρ_0 , T_0 – густина і температура середовища приміщення перед початком пожежі ($\rho_0 \cdot T_0 \approx 3 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}$); V_i – вільний об'єм відповідної частини приміщення, м^3 ; η – коефіцієнт повноти згоряння ($\eta \approx 0,97$; $\varphi \approx 0,5$ – коефіцієнт тепловтрат) [135]; $Q_{\text{н.р}}$ – найнижча робоча теплота згоряння, Дж/кг; x , y – координати по відстані та висоті, на яких визначається температура, м; x_0 – найближча половина відстані від осередку до вікна, м; y_0 – половина висоти приміщення, м.

2. Визначення температури на зовнішніх поверхнях залізобетонних кроквяних ферм залежно від температури середовища. Для визначення температури поверхні будівельної конструкції над конвективною колонкою

потрібно записати рівняння теплопровідності з граничними умовами третього роду, де температура середовища – функція від часу $T(y_w) = f(\tau)$, а y_w – ордината, яка нормальна до горизонтальної поверхні нижнього поясу ферми або арки з початком координат на поверхні, яка розміщена з боку дії вертикальної конвективної колонки від осередку пожежі. Для визначення температури поверхні ферми рівняння матиме такий вигляд:

$$\frac{\partial T(y_w)}{\partial \tau} = a_{red} \cdot \frac{\partial^2 T(y_w)}{\partial y_w^2};$$

з початковими умовами при $\tau = 0$

$$T(y_w, 0) = T_0;$$

та граничними умовами при $y_w = 0$

$$\frac{\partial T(y_w)}{\partial y_w} + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (T_m - T_w) = 0;$$

для визначення температури поверхні при $y_w = 0$ рівняння запишеться так [151]:

$$T(0, \tau) = \int_0^{\tau} f(\tau - v) \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a_{red}}{\pi \cdot v}} \cdot dv - \int_0^{\tau} a_{red} \cdot \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \cdot \exp\left(-a_{red} \cdot \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \cdot v\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a_{red} \cdot v}\right) dv, \quad (5.3)$$

де $f(\tau - v)$ – функція температури середовища від часу τ з урахуванням змінної v , яка при інтегруванні набуває значення від 0 до τ ($v = 0, 1, 2 \dots \tau$), °C; α – коефіцієнт теплообміну конструкції із середовищем, Вт/м²·°C; a_{red} –

коефіцієнт температуропровідності матеріалу, $\text{м}^2/\text{с}$; T_w – температура поверхні конструкції, $^{\circ}\text{C}$; α – коефіцієнт теплообміну, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

$\text{erfc}\left(\frac{y_w}{2\sqrt{a_{red}v}} + \frac{\alpha}{\lambda}\sqrt{a_{red}v}\right)$ – функція помилок Гауса; при $y_w = 0$ функція

помилки Гауса дорівнює $\text{erfc}\left(\frac{\alpha}{\lambda}\sqrt{a_{red}v}\right)$; λ – коефіцієнт теплопровідності

бетону, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$; a_{red} – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{хв}$.

Функцію температури середовища $f(\tau-v)$ від часу τ визначаємо, використовуючи залежність для стандартної температурної кривої пожежі

$$f(\tau) = 345 \log(8\tau - v + 1) + T_0.$$

Розрахунки температури поверхні ферми доцільно проводити з використанням пакета прикладних програм MathCad. Результати численних розрахунків для визначення температури T_w на зовнішніх поверхнях залізобетонних кроквяних сегментних, трапецієподібних та аркових ферм залежно від температури T_c середовища, в якому вони знаходяться, дали змогу отримати емпіричну залежність

$$T_w = 7,41 \cdot 10^{-6} T_c^{2,72}. \quad (5.4)$$

Найбільша відносна похибка розрахунку T_w за залежністю (5.4) не перевищує 6% у порівнянні з результатами, які отримані за залежністю (5.3).

3. Визначення критичної температури в перерізах залізобетонних кроквяних ферм залежно від часу тривалості пожежі. Відповідно до рекомендацій [192] для попередньо напруженої арматури значення допустимих напружень на розтяг $[R_{sp}]$ або на стиск $[R_{sp}']$ зменшуються за температури 500°C в 0,51 разу, а для ненапруженої арматури на розтяг $[R_s]$ або на стиск $[R_s']$ – в 0,7 разу. Одночасно для бетону на силікатному

заповнювачі за температури 500 °С допустимі значення напружень на стиск $[R_b]$ зменшуються в 0,6 разу, а на розтяг $[R_b']$ – в 0,2 разу. Значення допустимих напружень для арматури за нормальної температури приймаємо згідно з ДСТУ 3760:2006 [86], а для бетону – згідно з ДБН В.2.6-98:2009 [73]. У процесі деформації будівельної конструкції під дією температури від пожежі та після її ліквідації відбувається процес релаксації арматури, що призводить до зменшення значень допустимих напружень для арматури, тобто з певною імовірністю до можливого зменшення класу вогнестійкості ферми. Зменшення класу вогнестійкості може не відповідати за ступенем вогнестійкості будівлі необхідній мінімальній межі вогнестійкості конструкції за умовами ДБН В.1.1-7-2002 2, у такому разі потрібно буде виконувати капітальний ремонт покрівлі із заміною пошкоджених ферм. Тому збільшувати значення критичної температури понад 500 °С для розгляду цієї проблеми недоцільно.

На підставі результатів розгляду вищенаведених положень приймаємо критичну температуру для арматури ферми $T_{кр} = 500$ °С. Для визначення часу досягання критичної температури арматурою скористаємося залежністю (3) з урахуванням, що $y_w \neq 0$, тобто необхідно визначити температурне поле в часі для будівельної конструкції з використанням залежності

$$T(y_w, \tau) = \int_0^{\tau} f(\tau - v) \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a_{red}}{\pi \cdot v}} \cdot \exp\left(-\frac{y_w^2}{4 \cdot a_{red} \cdot v}\right) dv - \\ - \int_0^{\tau} a_{red} \cdot \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \cdot \exp\left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot y_w + a_{red} \cdot \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \cdot v\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{y_w}{2 \cdot \sqrt{a_{red} \cdot v}} + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a_{red} \cdot v}\right) dv. \quad (5.5)$$

На підставі аналізу температурних полів встановлюють час досягнення критичної температури для арматури і бетону.

4. Визначення міцності і відповідної вогнестійкості залізобетонних кроквяних ферм з урахуванням умов реальної пожежі. На підставі заданих

значень допустимих напружень за критичною температурою та з урахуванням часу її досягнення на перерізах арматури визначаємо значення допустимого згинального моменту $[M]$ в перерізах ферми і після цього переходимо до визначення дійсного значення максимального згинального моменту в небезпечному перерізі ферми. Порівнявши значення дійсного значення максимального згинального моменту $M_{\max}$ з допустимим за умови $M_{\max} \leq [M]$, встановлюємо межу вогнестійкості за забезпеченням несучої здатності (R) ферми. Крім того, потрібно визначити допустиме значення стискаючої сили $[P]$ у стійці ферми. Необхідно щоб дійсне значення максимальної стискаючої сили $P_{\max}$ було менше або бодай дорівнювало допустимому значенню. Після цього встановлюємо для арматури допустиме значення напружень пошкодженої ферми з урахуванням релаксації її матеріалу після пожежі.

Визначаємо допустимі згинальний момент і стискаючу силу, які діють у конструктивних елементах ферми згідно з рекомендаціями [192]. Допустиме значення згинального моменту

$$[M] = [M_{u1}] + [M_{u2}], \quad (5.6)$$

де $[M_{u1}]$ – допустиме значення згинального моменту від частини розтягнутої арматури в рівновазі зі стисненим бетонним масивом; $[M_{u2}]$ – допустиме значення згинального моменту від частини розтягнутої арматури в рівновазі зі стиснутою арматурою.

Для визначення допустимого згинального моменту в перерізах балок ферми скористаємося значенням рівноваги моментів відносно розтягнутої арматури (рис. 5.5).

У цьому випадку при $F_s = A_s'[R'_{sp}]$ (де A_s' – площа стиснутої арматури) отримаємо для попередньо напруженої арматури суму моментів відносно осі X , яка дорівнюватиме нулю (рис. 5.5)

$$[M] - 0,5\lambda d_{fi} b_{fi} [R_b] z - A'_s [R'_{sp}] z' = 0, \quad (5.7)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує ефективну висоту стиснутої зони бетону, $\lambda = 0,8$ при $R_b \leq 50$ МПа [264]; d_{fi} – робоча висота приведенного поперечного перерізу балки ферми, мм (при двосторонньому прогріві балки ферми вогневим впливом $d_{fi} = h$; при тристоронньому прогріві балки ферми вогневим впливом $d_{fi} = h - 50$, де h – дійсна висота поперечного перерізу балки ферми, мм; при чотиристоронньому прогріві балки ферми вогневим впливом $d_{fi} = h - 100$; b_{fi} – ширина приведенного поперечного перерізу балки ферми, мм ($b_{fi} = b - 100$, де b – дійсна ширина поперечного перерізу балки ферми, мм); z – відстань між розтягнутою арматурою і бетоном, мм (при тристоронньому прогріві балки ферми вогневим впливом $z = h - 50 - 0,25\lambda d_{fi}$, де h – дійсна висота поперечного перерізу балки ферми, мм; при чотиристоронньому прогріві балки ферми вогневим впливом $z = h - 100 + 0,5d$)

$$A'_s = \frac{\pi d^2 z_s}{4}, \text{ мм}^2;$$

d – розрахунковий діаметр арматури; z_s – кількість арматури, яка стиснута; z' – відстань між розтягнутою і стиснутою арматурами, мм.

Розв'язавши рівняння (5.7) відносно $[M]$, отримуємо значення допустимого згинального моменту для попередньо напруженої арматури нижнього поясу ферми. При цьому враховуємо, що небезпечний переріз проходить посередині довжини ферми з розміщенням його у стійці, яка з'єднує нижній пояс ферми з аркою (такий переріз висотою h , який дорівнює висоті ферми H (рис. 5.6), значно підвищує міцність нижнього поясу ферми)

$$[M_{n.n}] = 0,5\lambda d_{fi} b_{fi} [R_b] z + A'_s [R'_{sp}] z'. \quad (5.8)$$

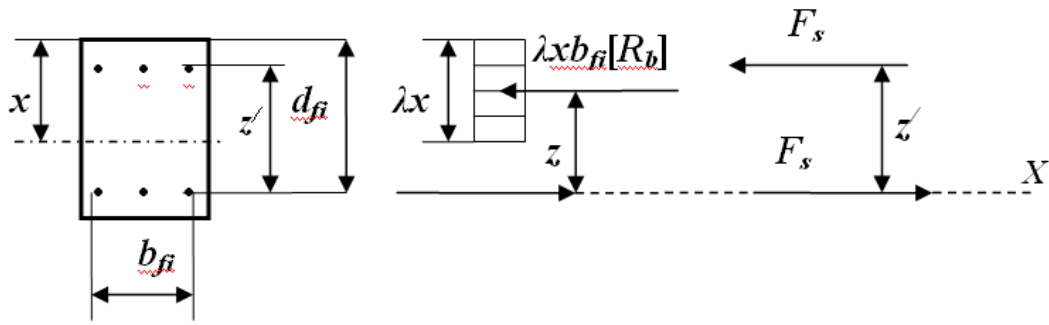


Рис. 5.5. Розподіл напружень за критичної несучої здатності залізобетонного прямокутного перерізу зі стиснутим армуванням

Для попередньо ненапруженої арматури арки ферми значення допустимого згинального моменту буде

$$[M_a] = 0,5\lambda d_{fi} b_{fi} [R_b] z + A'_s [R'_s] z'. \quad (5.9)$$

На підставі отриманих залежностей (5.8) і (5.9) визначимо значення допустимих згинальних моментів для перерізів розглядуваної конструкції ферми з урахуванням критичної температури $T_{кр} = 500^\circ\text{C}$.

Вихідні дані для арки: $\lambda = 0,8$; $d_{fi} = h - 50 = 210 - 50 = 160$ мм; $b_{fi} = b - 100 = 240 - 100 = 140$ мм; $[R_b] = 0,6R_b = 0,6 \cdot 22 = 13,2$ МПа; $z = h - 50 - 0,25\lambda d_{fi} = 210 - 50 - 0,25 \cdot 0,8 \cdot 160 = 178$ мм; номінальний діаметр арматури $d_n = 16$ мм,

а розрахунковий $d = 14,8$ мм [86]; $A'_s = \frac{\pi d^2 z_s}{4} = \frac{3,14 \cdot 14,8^2 \cdot 2}{4} = 343,89$ мм²;

$[R'_s] = 0,7R_s = 0,7 \cdot 795 = 556,5$ МПа; $z' = 110$ мм.

Тоді допустиме значення згинального моменту для арки ферми (арматура попередньо ненапружена) в небезпечному перерізі при тристоронньому прогріві балки буде

$$[M_a] = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 160 \cdot 140 \cdot 13,2 \cdot 178 + 343,89 \cdot 556,5 \cdot 110 = 4103642 \text{ Н}\cdot\text{мм} \approx 42,1 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Аналогічно визначаємо допустиме значення згинального моменту для нижнього поясу арки ферми (арматура попередньо напружена) в небезпечному перерізі при чотиристоронньому прогріві балки

$$[M_{н.н}] = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 210 \cdot 140 \cdot 13,2 \cdot 2360 + 343,89 \cdot 405,45 \cdot 2900 = 770695101,45 \text{ Н} \cdot \text{мм} \approx 770,7 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Також потрібно визначити допустиме значення стискаючої сили $[P]$ в стійці ферми (арматура попередньо ненапружена) при її чотиристоронньому прогріві з такими вихідними даними: $d_{fi} = h - 100 = 210 - 100 = 110 \text{ мм}$; $b_{fi} = b - 100 = 240 - 100 = 140 \text{ мм}$; $[R_b] = 0,6R_b = 0,6 \cdot 22 = 13,2 \text{ МПа}$; номінальний діаметр арматури $d_n = 16 \text{ мм}$, а розрахунковий $d = 14,8 \text{ мм}$;

$$A'_s = \frac{\pi d^2 z_s}{4} = \frac{3,14 \cdot 14,8^2 \cdot 6}{4} = 1031,68 \text{ мм}^2; [R'_s] = 0,7R_s = 0,7 \cdot 795 = 556,5 \text{ МПа}.$$

Тоді

$$[P] = d_{fi} b_{fi} [R_b] + A'_s [R'_s]; \quad (5.10)$$

$$[P] = 110 \cdot 140 \cdot 13,2 + 1031,68 \cdot 556,5 = 777409 \text{ Н} \approx 777,4 \text{ кН}.$$

Визначаємо навантаження на конструктивні елементи ферми. Для цього потрібно встановити вид покриття та його питоме навантаження. В більшості випадків на кроквяну ферму встановлюють залізобетонні ребристі плити шириною 3 м і довжиною 6 м. На плити наносять захисний шар гравію, який втоплюють в бітумну мастику, а зверху наклеюють три-чотири шари руберойду та захисний шар руберойду. Потім накладають плиточний пінополістирол і пароізоляцію з руберойду за допомогою мастики. Така конструкція покрівлі від маси покриття та сніжного покриву передає на кроквяну ферму рівномірно розподілене навантаження $p = 75 \dots 150 \text{ кг/м}^2$ [244]. Для покриття однієї ферми, які розміщуються по будівлі цеху з кроком 6 м при ширині прольоту 18 000 мм, необхідно шість залізобетонних ребристих плит. У цьому випадку загальна площа навантаження на одну

ферму становитиме $S = 18 \cdot 6 = 108 \text{ м}^2$. Крім цього, для визначення рівномірно розподіленого навантаження по довжині арки потрібно розрахувати довжину дуги l арки, радіус якої r , а довжина хорди L при висоті арки H

$$l = \alpha r, \quad (5.11)$$

де α – центральний кут, який охоплює хорду довжиною L , рад.;

$$\alpha = \left(2 \arcsin \frac{L}{2r} \right) \frac{\pi}{180^\circ}.$$

Тоді рівномірно розподілене навантаження по довжині арки на одну ферму складатиме

$$q = \frac{gpS}{1000l}, \text{ кН/м} \quad (5.12)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Визначаємо міцність і відповідну вогнестійкість залізобетонних аркових безроскісних кроквяних ферм. Для визначення сил, які діють на ферму, скористаємося схемою її навантаження, яка зображена на рис. 5.5. На ферму діють такі зусилля: 1) на кожний з елементів арки ферми, які розміщені між стійками, тобто на балки зі статично невизначеною системою, діє рівномірно розподілене навантаження, з максимальним за значенням вертикальним осьовим зусиллям $P_{ai} = ql_{ij}$, де l_{ij} – відстань між стійками ферми; 2) на стійки ферми діють сили P_{ai} від рівномірно розподіленого навантаження; 3) на нижній пояс ферми діють сила $F = ql$ від рівномірно розподіленого навантаження, яке діє на арку ферми, та сила ваги від маси всієї ферми $Q = gt_\phi$, де t_ϕ – маса ферми.

Визначивши зусилля, які діють на ферму, переходимо до визначення відповідних згинальних моментів і стискаючої сили з використанням розрахункової схеми (рис. 5.6).

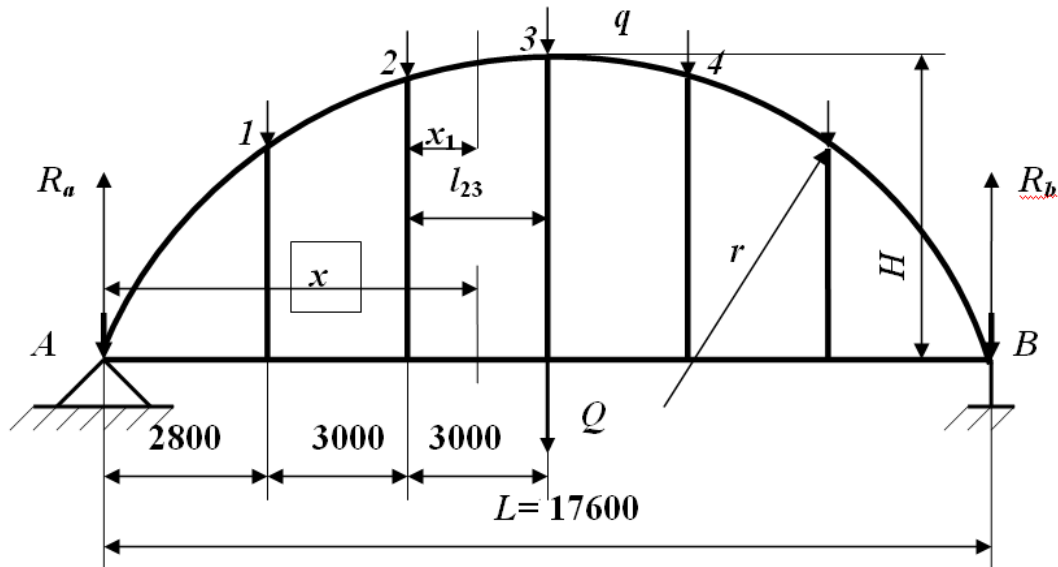


Рис. 5.6. Розрахункова схема навантаження залізобетонної кроквяної аркової ферми

Виходячи з основних положень теорії опору матеріалів [186], для статично невизначених систем з використанням методу сил визначаємо значення згинального моменту, зокрема й максимального в небезпечному перерізі арки, наприклад, для прольоту 2-3 (рис. 5.6)

$$M_a(x_1) = \frac{1}{8} P_{a3}(4x_1 - l_{23}); \quad M_{a\max} = \frac{1}{8} P_{ai} l_{ij} \leq [M_a]. \quad (5.13)$$

Згинальний момент, зокрема і максимальний в небезпечному перерізі для нижнього поясу ферми

$$M_{n.n}(x) = \left(\frac{ql}{2} + \frac{Q}{2} \right) x - \frac{ql_x x}{2}; \quad M_{n.n.\max} = \frac{qlL}{8} + \frac{QL}{4} \leq [M_{n.n}], \quad (5.14)$$

де l_x – довжина дії рівномірно розподіленого навантаження по довжині арки в межах абсциси x .

Значення стискуючої сили, яка діє на одну стійку ферми

$$P_{ai} = ql_{ij} \leq [P]. \quad (5.15)$$

Крім цього, згідно з ДСТУ Б.В.1.2-3:2006 необхідно перевіряти прогин f нижнього поясу ферми з його допустимим значенням f_u . Для визначення прогину використаємо залежність

$$f = \frac{(ql + Q)L^3}{48k_t EI_{36}} \leq f_u = \frac{L}{250}, \quad (5.16)$$

де q , кН/м; Q , кН; L , м; k_t – коефіцієнт, який враховує вплив температури на значення модуля пружності; E – модуль пружності матеріалу арматури, кН/м²; I_{36} – зведений момент інерції, перерізу, м⁴; f_u – граничне значення прогину [87, табл. 1].

Після перевірки конструкції ферми на міцність необхідно визначити час поширення теплового потоку в кожному елементі конструкції ферми до температури 500 °С від зовнішніх поверхонь до арматури з використанням залежностей (5.1)...(5.3) та (5.5) з побудовою відповідних графічних залежностей. Визначивши часи поширення теплового потоку, вибирають найменше значення, яке й відповідатиме граничному стану вогнестійкості розглянутої ферми.

Встановлюємо для арматури і бетону ферми допустиме значення напружень після пожежі з урахуванням релаксації її матеріалу. У процесі нагрівання під дією зовнішніх сталих зусиль конструкція деформується. Після охолодження, тобто після ліквідації пожежі отримані деформації стають залишковими завдяки релаксації матеріалу, яка впливає на зменшення значень допустимих напружень. Вплив релаксації матеріалу залізобетонних

конструкцій на їх міцність досліджувало багато науково-дослідних установ. Результати таких робіт розглянемо на прикладі праці [202].

Основними елементами залізобетонної конструкції є арматура і бетон. Розглянемо вплив температури і, відповідно, релаксації на зменшення допустимих напружень для арматури і бетону. Цей вплив будемо враховувати коефіцієнтами k_{ts} для арматури та k_{tb} для бетону, значення яких зображено відповідно на рис. 5.7.

При розрахунках вогнестійкості ферм після пожежі потрібно передусім встановити температуру, до значення якої прогрілися бетон і арматура. Після цього, користуючись графічною залежністю, яка зображена на рис. 5.7, необхідно визначити значення коефіцієнтів k_{ts} і k_{tb} . Для визначення дійсних значень допустимих напружень потрібно допустимі напруження до температурного впливу помножити на визначені коефіцієнти зниження міцності.

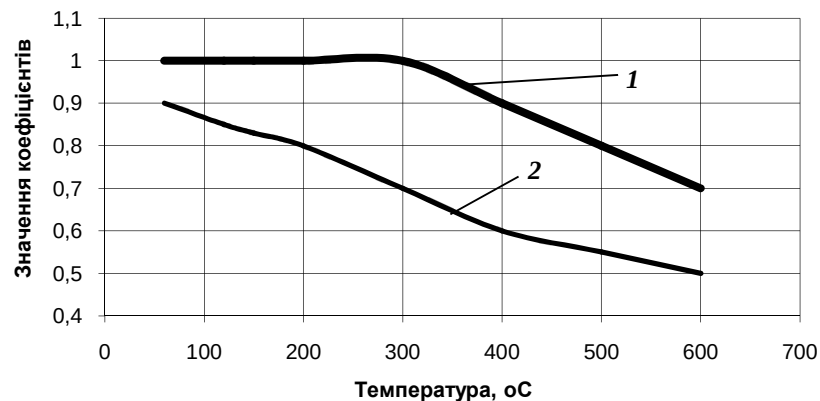


Рис. 5.7. Вплив температури на значення коефіцієнтів: 1 – k_{ts} ; 2 – k_{tb}

Результати виконаної роботи з розроблення методології визначення межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій скатних покрівель дозволили зробити такі висновки:

- розроблено методологію для встановлення класу вогнестійкості кроквяних ферм для скатних покрівель за ознакою втрати несучої здатності, яка дозволяє за умови якісного виготовлення ферми встановити клас вогнестійкості без виконання вогневих експериментів;

- алгоритм визначення класу вогнестійкості кроквяних ферм для скатних покрівель за ознакою втрати несучої здатності містить вісім блоків для розрахунку основних чинників, які впливають на встановлення класу вогнестійкості;
- для виконання розрахунків за розробленим алгоритмом потрібно виконати підготовчу роботу для визначення допустимих значень згинальних моментів арки та нижнього поясу ферми, а також допустиме значення стискаючої сили для стійки та допустиме значення прогину ферми з ДСТУ Б.В.1.2-3:2006.

5.3 Порівняльний аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень вогнестійкості будівельних конструкцій та їх оцінка для деревообробних підприємств

Для підтвердження використання розробленої методології визначення межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій скатних покрівель на практиці виконаємо порівняльний аналіз результатів теоретичних досліджень з результатами експериментів, які виконувалися для визначення вогнестійкості будівельних конструкцій, та оцінимо їх розбіжність.

Розглянемо наведену методологію визначення граничного стану вогнестійкості аркової ферми на конкретному прикладі.

Приклад. Визначити клас вогнестійкості аркової безроскісної залізобетонної кроквяної ферми при досягненні арматурою критичної температури 500 °С. Ферма використовується для перекриття прольоту шириною 18 000 мм. Радіус арки $r = 15,5$ м, $H = 3$ м. Всі інші розміри ферми наведено на рис. 5.6, а розміри перерізів конструктивних елементів – на рис. 5.4. $Q_{n,p} = 13\,800$ кДж/кг; $v_n = 0,022$ м/с; $\psi_n = 0,0145$ кг/м²с. Коефіцієнт теплообміну конструкції зі середовищем $\alpha = 25$ Вт/м²·°С; коефіцієнт теплопровідності матеріалу конструкції $\lambda = 1,2$ Вт/м·°С; коефіцієнт температуропровідності матеріалу $a_{red} = 3,69 \cdot 10^{-7}$ м²/с; коефіцієнт, який враховує вплив температури

500 °C на значення модуля пружності $k_t = 0,6$ [192]; маса ферми $m_\phi = 6500$ кг; рівномірно розподілене навантаження $p = 100$ кг/м²; пожежа кругова і виникла на підлозі цеху посередині загальної довжини ферми.

Розв'язок.

1. Визначаємо довжину дуги l арки за залежністю (5.11)

$$\alpha = \left(2 \arcsin \frac{17,6}{2 \cdot 15,5} \right) \frac{3,14}{180^\circ} = 1,22 \text{ рад}; \quad l = 1,22 \cdot 15,5 = 18,91 \text{ м.}$$

2. Визначаємо рівномірно розподілене навантаження по довжині арки на одну ферму за залежністю (5.12)

$$q = \frac{9,81 \cdot 100 \cdot 108}{1000 \cdot 18,91} = 5,78 \text{ кН/м.}$$

4. Визначаємо максимальне значення згинальної сили, яка діє на арку між стійками ферми, наприклад, тобто між вузлами 2 і 3 третього прольоту ферми (рис. 5.6)

$$P_{a3} = ql_{23} = 5,78 \cdot 3 = 17,34 \text{ кН.}$$

5. Розраховуємо максимальний згинальний момент в небезпечному перерізі арки за залежністю (5.13) та порівнюємо з допустимим значенням

$$M_{a\max} = \frac{1}{8} 17,34 \cdot 3 = 6,5 \text{ кН} \cdot \text{м} < [M_a] = 42,1 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

що забезпечується встановлена міцність арки ферми.

6. Розраховуємо максимальний згинальний момент в небезпечному перерізі для нижнього поясу ферми за залежністю (5.14) та порівнюємо з допустимим значенням

$$M_{n.n.\max} = \frac{5,78 \cdot 18,91 \cdot 17,6}{8} + \frac{6,5 \cdot 9,81 \cdot 17,6}{4} = 521 \text{ кН} \cdot \text{м} < [M_{n.n.}] = 770,7 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

7. Визначаємо стискуючу силу, яка діє на одну стійку ферми, за залежністю (5.15) та порівнюємо з допустимим значенням

$$P_{a3} = ql_{23} = 5,78 \cdot 3 = 17,34 \text{ кН} < [P] = 777,4 \text{ кН}.$$

8. Визначаємо прогин f нижнього поясу ферми за залежністю (5.16) і порівнюємо з його допустимим значенням f_u при $I_{36} = 0,0043 \text{ м}^4$

$$f = \frac{(5,78 \cdot 18,91 + 63,8)17,6^3}{48 \cdot 0,6 \cdot 20 \cdot 10^7 \cdot 0,0043} = 0,038 \text{ м} < f_u = \frac{17,6}{250} = 0,0704 \text{ м}.$$

Результати розрахунків ферми на міцність за температури 500 °С для арматури і відповідно бетону показали, що міцність ферми забезпечується. Після цього переходимо до визначення часу прогріву арматури і бетону на глибину 50 мм, тобто на глибину розміщення осі арматури з використанням залежностей (5.1)–(5.3) та (5.5). Результати розрахунків для заданих умов зображено на рис. 5.8.

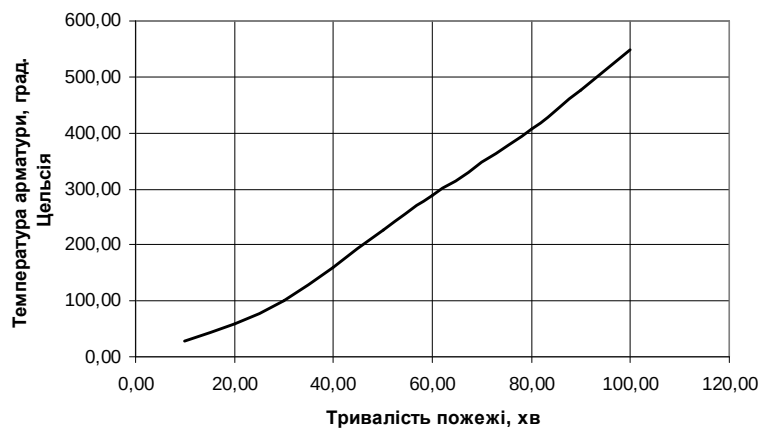


Рис. 5.8. Залежність температури арматури (товщина захисного шару 50 мм) від тривалості пожежі

На підставі аналізу отриманих результатів можна стверджувати, що аркова безроскісна кроквяна ферма за ознакою втрати несучої здатності належить до класу вогнестійкості **R90**. За результатами розрахунків температура 500 °С була досягнута арматурою при товщині захисного шару бетону 50 мм за 95 хв. На 95-й хв температура середовища за результатами розрахунків була 1014 °С, а температура зовнішніх поверхонь елементів конструкції ферми – 901 °С.

Отримані результати теоретичних досліджень було порівняно з результатами експериментальних випробувань на вогнестійкість залізобетонних перемичок ЗПБ18-8 виробництва ТДВ «ХМЕЛЬНИЦЬКЗАЛІЗОБЕТОН». Для порівняння результатів виконували відповідне приведення розмірів, навантаження і температури нижнього поясу ферми до розмірів, навантаження і температури перемичок. Експериментальні дослідження виконував Науково-випробувальний центр «СВРОСТАНДАРТ». Граничним станом за ознакою втрати несучої здатності залізобетонних перемичок при проведенні випробувань було граничне значення прогину $f_u = 30,56$ мм. Для нижнього поясу ферми за результатами виконаного приведення граничне значення прогину становило $f_u = 35$ мм. Для визначення прогину нижнього поясу ферми була прийнята температура арматури 300 °С, що відповідає часу вогневої дії 62 хв на залізобетонні перемички (згідно з протоколом досліджень № 1/БК-14). При цьому прогин нижнього поясу ферми склав 28 мм, а для залізобетонних перемичок за результатами експериментів – 29,61 мм. Відносна похибка становить

$$\Delta = \frac{f_n - f_{н.н}}{f_n} 100 = \frac{29,61 - 28}{29,61} 100 = 5,44\%.$$

Така похибка вказує на можливість використання розробленої методології для встановлення класу вогнестійкості кроквяних ферм для скатних покрівель.

Висновки

Результати виконаної роботи дозволили зробити такі висновки:

1. Розроблено методологію для встановлення класу вогнестійкості кроквяних ферм для скатних покрівель за ознакою втрати несучої здатності, яка дозволяє за умови якісного виготовлення ферми встановити клас вогнестійкості без виконання вогневих експериментів. Загальна відносна похибка теоретичних розрахунків відносно результатів експериментальних досліджень, як показали численні результати досліджень, не перевищує 5...8%.

2. Встановлено, що вогнестійкість кроквяних ферм скатних покрівель залізобетонної конструкції деревообробних цехів з шириною прольоту 18 000 мм за ознакою втрати несучої здатності належить до класу вогнестійкості **R90**.

3. Для проведення розрахунків за розробленою методологією перед їх виконанням необхідно визначити значення допустимих згинальних моментів для конструкції ферми, а також значення допустимих стискаючих сил для кожної стійки, а також допустиме значення прогину ферми з ДСТУ Б.В.1.2-3:2006.

4. Впровадження розробленої методології для встановлення класу вогнестійкості кроквяних ферм для скатних покрівель за ознакою втрати несучої здатності дозволяє значно зменшити витрати на її визначення.

РОЗДІЛ 6

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТАКТИКИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

6.1 Локалізація пожежі на деревообробних підприємствах

У попередніх розділах ми розробили математичні моделі теплових процесів, які виникають у закритих приміщеннях цехів і на відкритих складах лісоматеріалів. Окрім цього, розглянули питання швидкості поширення фронту пожежі з визначенням критичного її часу. Тож виникає питання про вибір оптимального варіанта плану локалізації пожежі при її виникненні в цеху деревообробного підприємства або на відкритому складі лісоматеріалів.

6.1.1 Локалізація пожежі в закритому приміщенні цеху

Залежно від виду продукції, яку виготовляють, 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/м² залежно від виду виробництва, а лінійна швидкість поширення вогню під час пожежі лежить у межах 2...5 м/хв. Тому виникнення пожежі та її несвоєчасна ліквідація призводять до значних збитків. У працях [136–138, 179] для визначення збитків від пожежі використовували загальні витрати у вигляді прямих збитків від пожежі та витрати пожежно-рятувальних частин на її ліквідацію. Проте для визначення та прогнозування таких збитків потрібно мати дані статистики, які були б подібними для розглядуваного випадку. Зменшення таких збитків можливе тільки за умови оперативного та якісного виконання оптимально необхідних тактичних прийомів підрозділами Державної служби надзвичайних ситуацій для швидкої

локалізації і гасіння пожежі. Безумовно, для реалізації такої умови керівник гасіння пожежі (КГП) мусить мати дуже великий практичний досвід та необхідний довідниковий науково обґрунтований матеріал для швидкого ухвалення оптимальних рішень в умовах невизначеності [20].

Існують нормативні документи для орієнтовного визначення тривалості гасіння пожежі, які враховують численні статистичні дані [92]. Але в кожному конкретному випадку такий підхід не може бути обґрунтованим. Тому виникає потреба в більш точному прогнозуванні часу локалізації пожежі, на значення якого впливає, насамперед, оптимальний для конкретних умов варіант тактичних дій при локалізації та гасінні пожежі. Розв'язати таку проблему можна за рахунок розроблення і можливості оперативного використання КГП оптимальних тактичних прийомів для локалізації та гасіння пожеж у приміщеннях цехів деревообробних підприємств. При цьому відкритим залишається питання, що робити, якщо не вдається відразу розгорнути достатньо стволів і як вибрати першочергове завдання. Розстановку сил і засобів виконує КГП відповідно до 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

6.1.2 Локалізація пожежі на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів

Як ми вже зазначали, пожежі на відкритих складах лісоматеріалів характеризуються розкидуванням іскор і головешок на великі відстані, радіус яких залежить від висоти їх підйому конвективною колонкою, а також швидкості вітру.

У разі несвоєчасної ліквідації пожежі виникають значні збитки. Зменшити такі збитки можна 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 потрібно вирішувати і такі завдання: 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.

6.2 Моделювання тактики локалізації та гасіння пожежі

6.2.1 В закритому приміщенні цеху

Першочерговим завданням процесу гасіння пожежі є її локалізація, від успішного виконання якої залежить швидкість процесу гасіння. Відомо, що існує чимало позицій розміщення сил і засобів для проведення процесу локалізації. Тому постає завдання визначити найкращу (оптимальну) позицію їх розміщення, вирішення якого 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 розташування 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 розумітимемо найменший час, який задовольняє всі умови 2...10. У цьому випадку матеріальні втрати від пожежі і пожежно-рятувальних підрозділів повинні бути найменшими.

Тривалість часу вільного розвитку пожежі істотно впливає на тривалість часу локалізації. Цей час передусім залежить від оперативності пожежно-рятувальних підрозділів, тобто від часу початку процесу локалізації першими стволами [36].

Форма площі пожежі та місце її розташування в приміщенні впливають на розміщення сил і засобів локалізації пожежі. Крім цього, потрібно 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 з правилами охорони праці при локалізації і гасінні пожежі. Тому необхідно вибирати позицію з меншим тепловим потоком. У процесі локалізації фронт пожежі може бути розміщений за певними перешкодами (колони, пожежні перегородки відсіків тощо). У практичній ситуації кожний засіб для локалізації пожежі повинен знаходитися у 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 потрібно враховувати їх місця розташування, які дозволяли б подавати струмінь на необхідну

глибину від фронту пожежі. Крім цього, треба також враховувати можливу довжину рукавної лінії та правила охорони праці в процесі локалізації і гасіння пожежі.

Математична постановка задачі оптимізації [48, 109, 123, 267, 276, 308]. Перший чинник приймаємо за функцію мети, яка в нашому випадку повинна мати при розв'язанні задачі найменше значення, тобто

$$\tau_{\text{лок}} + \tau_z \Rightarrow \min. \quad (6.1)$$

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

$$B \Rightarrow \min. \quad (6.2)$$

Чинники 3...10 є обмеженнями при розв'язку оптимізаційної задачі. У цьому випадку ставиться задача отримання найменшого часу локалізації і гасіння пожежі, виходячи з наявних сил і засобів так, щоб виконати обмеження 3...10.

Сформулюємо основні допущення, які відносяться до задачі оптимізації.

1. Для проведення локалізації пожежі маємо N_{Σ} пожежних стволів з різним часом оперативного розгортання. Це пов'язано з неодночасним прибуттям до місця виклику пожежно-рятувальних підрозділів. Тобто тривалість оперативного розгортання $\tau_{\text{роз}}$ залежить від тривалості оперативного розгортання τ_i всіх стволів від 1 до N_{Σ}

$$\tau_{\text{роз}} \in \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{N_{\Sigma}}. \quad (6.3)$$

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. У 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 у приміщеннях цехів деревообробних підприємств визначимо прогнозований час з моменту виникнення пожежі до початку її локалізації силами пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України, тобто прогнозований час вільного горіння $\tau_{в.г}$:

$$\tau_{в.г} = \tau_{в.в} + \tau_{сн} + \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз}, \quad (6.4)$$

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 [36, 149, 168, 311]); $\tau_{роз}$ – час оперативного розгортання; $\tau_{роз} = 7$ хв [37].

На підставі наведених нормативних і статистичних даних можна за залежністю (6.4) визначити середнє значення тривалості вільного розвитку пожежі:

$$\tau_{в.г} = 6,5 + 3,5 + 1 + 3 + 1 + 13,9 + 7 = 35,9 \text{ хв.} \quad (6.5)$$

Аналізуючи отриманий результат, можна зробити висновок, що час тривалості вільного розвитку пожежі значний, тобто за цей час об'єкт, на якому виникла пожежа, зазнає від її дії значних збитків. Тому необхідно по змозі швидко локалізувати пожежу і взятися за 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 і для об'єкта, і для пожежно-рятувальних підрозділів.

Розглянемо можливі обмеження для оперативного розгортання, які пов'язані з формами площі пожежі та місцями її розміщення у приміщенні. Для цього скористаємося схемою приміщення деревообробного цеху, яка зображена на рис. 6.1.

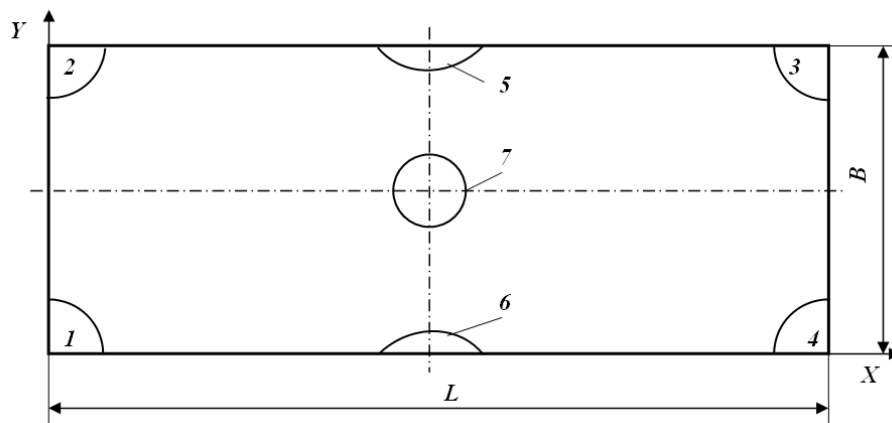


Рис. 6.1. Схема приміщення цеху деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями і формами площі пожежі: 1, 2, 3, 4 – кутова форма (90°); 5, 6 – кутова форма (180°); 7 – кругова

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 $150 \dots 200$ кг/м². Результати аналізу виникнення пожеж у приміщеннях цехів деревообробних підприємств показали, що більшість (73%) пожежних ситуацій, яких може бути багато, відповідають семи пожежним ситуаціям,

які зображено на рис. 6.1 [103]. Розмістивши приміщення цеху в системі координат XU (рис. 6.1), 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 залежно від площі пожежі можливі різні тактичні плани розміщення сил і засобів для локалізації та гасіння пожежі.

Наявність пожежних відсіків у приміщенні цеху значно зменшує швидкість поширення полум'я пожежі. У підрозділі 2.4 встановлено, що наявність пожежних відсіків зменшує швидкість розповсюдження пожежі в 1,8 разу. Цей вплив пожежних відсіків на зменшення швидкості поширення полум'я пожежі враховується коефіцієнтом $\xi = 1,8$.

Безпечний рівень теплового потоку від фронту пожежі впливає на відстань від пожежного зі стволом до фронту пожежі. Для вибору критичного значення густини теплового потоку для пожежного скористаємося рекомендаціями, які наведено в роботі [92] (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Потрібний захист і допустимий час перебування людей
в зоні теплової радіації

Густина теплового потоку q , кВт/м ²	Допустимий час перебування людей, хв	Потрібний захист людей	Ступінь теплової дії на шкіру людини
3,0	Не обмежується	Без захисту	Больових відчуттів немає
4,2	Не обмежується	В захисному одязі та в касці із захищеним склом	Нестерпні больові відчуття через 20 с
7,0	5	Те саме	Нестерпні больові відчуття, які виникають миттєво

Визначимо густину теплового потоку q від полум'я пожежі в навколишнє середовище закритого приміщення цеху. Для цього скористаємося рекомендаціями, які наведено в роботі [93]

$$q = \frac{\sigma(T_{\phi}^4 - T_0^4)}{\frac{1}{A_{\phi}} + \frac{1}{A_c} - 1 + \frac{3\alpha x}{4}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (6.7)$$

де $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – стала Стефана-Больцмана; T_ϕ – температура факела полум'я осередку пожежі, К; T_0 – температура навколишнього середовища, К; $A_\phi = 0,9$ – поглинальна здатність факела полум'я [134]; $A_0 = 0,6$ – поглинальна здатність середовища [134]; $\bar{\alpha}$ – осереднений за спектром коефіцієнт поглинання середовища $\bar{\alpha} = 0,89$ м⁻¹ [135]; x – дійсна відстань між пожежником зі стволом і центром факела осередку пожежі, м.

Температуру T_ϕ факела визначаємо за залежністю [52]

$$T_\phi = \frac{Q_{\min} \psi_n \tau_{6,2}}{c_p G}, K \quad (6.8)$$

де $Q_{\min}$ – значення найнижчої робочої теплоти згорання горючого навантаження, кДж/кг; ψ_n – питома швидкість вигорання, кг/м²с; $\tau_{6,2}$ – 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/м².

Для визначення дійсної відстані x між пожежником зі стволом і центром факела осередку пожежі на першому етапі визначимо відстань l_ϕ в м між центром факела та фронтом пожежі з урахуванням площі пожежі S_{II} в м².

У випадку кутової пожежі (90°)

$$l_\phi = 0,5R_{II} = 0,56\sqrt{S_{II}}. \quad (6.9)$$

Для кутової пожежі (180°)

$$l_\phi = 0,5R_{II} = 0,4\sqrt{S_{II}}. \quad (6.10)$$

Для кругової пожежі (360°)

$$l_{\phi} = R_{\Pi} = 0,56\sqrt{S_{\Pi}}. \quad (6.11)$$

Тоді дійсна відстань між пожежником зі стволом і центром факела осередку пожежі

$$x = l_{\phi} + l_q,$$

де l_q – відстань пожежника зі стволом 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 було отримано залежність для визначення відстані пожежника зі стволом від фронту пожежі l_q в м на підставі численних розрахунків за залежностями (7)–(11) з обробленням отриманих результатів методами математичної статистики

$$l_q = 23,2 \left(\frac{S_{\Pi}^{0,27}}{[q]} \right)^{0,7}, \quad (6.12)$$

де $[q]$ – допустиме значення густини теплового потоку для заданих умов локалізації і гасіння пожежі, кВт/м².

Мінімально необхідну кількість пожежних стволів для локалізації і гасіння пожежі можна визначити на підставі рекомендацій робіт [48, 69]. Згідно з рекомендаціями визначаємо кількість стволів B на гасіння (N_B^{Γ}) і захист (N_B^3)

$$N_B^{\Gamma} = \frac{Q_n^{\Gamma}}{Q_B}; \quad (6.13)$$

$$N_B^3 = \frac{Q_n^3}{Q_B}, \quad (6.14)$$

де Q_n^r 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 діаметрі насадки $d = 13$ мм становить 3,7 л/с)

$$Q_n^r = S_{\Pi} I_n^r; \quad (6.15)$$

$$Q_n^3 = 0,25 K_3 S_{\Pi} I_n^r, \quad (6.16)$$

I_n^r – інтенсивність подачі вогнегасної речовини для локалізації гасіння пожежі, л/м²с (рекомендоване значення для ручних стволів $I_n^r = 0,2$ л/м²с); $K_3 = 2,0 \dots 2,2$ – 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

$$N_{B\Sigma} = N_B^r + N_B^3. \quad (6.17)$$

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_B^r на підставі рекомендацій [92]

$$N_A = 0,3 N_B^r. \quad (6.18)$$

Тоді загальна кількість стволів буде

$$N_{\Sigma} = N_B^I + N_B^3 + N_A. \quad (6.19)$$

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 скористаємося рекомендаціями, які наведені у праці [92]. Аналіз проведемо на підставі розгляду тиску або розрядження на висоті від підлоги до площини рівних тисків у відділеннях прямокутного приміщення деревообробного цеху (рис. 6.3), на які впливає кут дії α_{ϵ} вітру, тобто від напрямку дії якого залежить значення аеродинамічного коефіцієнта k_{ϵ} (табл. 6.2).

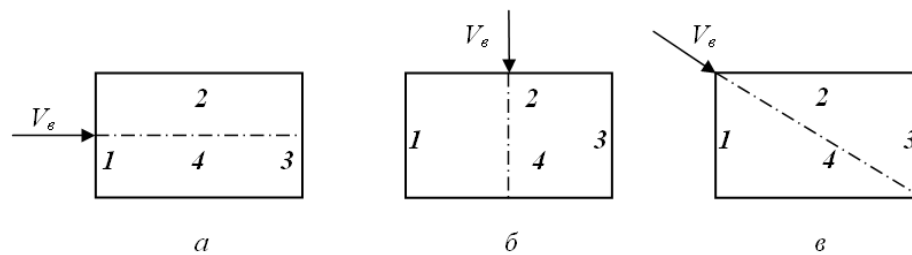


Рис. 6.3. Схеми приміщень та їх відділень з напрямком дії на них вітру

На підставі наведених даних можна для кожної ділянки приміщення цеху визначити абсолютне значення надлишкового тиску або розрядження ΔP_{ϵ} в Па від дії вітру за залежністю

$$|\Delta P_{\epsilon}| = \frac{177,2 V_{\epsilon}^2 k_{\epsilon}}{T_c g}, \quad (6.20)$$

де V_{ϵ} – швидкість вітру, м/с; k_{ϵ} – аеродинамічний коефіцієнт (табл. 6.2); T_c – середньооб'ємна температура середовища для розглядуваної ділянки цеху, К; g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²).

Таблиця 6.2

Значення аеродинамічних коефіцієнтів для приміщень прямокутної форми

Кут дії вітру α , град.	0° рис. 3, а				90° рис. 3, б				45° рис. 3, в			
Номер відділення	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Значення аеродина- мічного кое- фіцієнта k_e	0,65	-0,37	-0,15	-0,37	-0,52	0,66	-0,52	-0,24	0,36	0,36	-0,38	-0,48

Швидкість переміщення газів залежить передусім від перепаду тиску. З урахуванням рівняння Бернуллі та результатів досліджень щодо впливу швидкості переміщення газів на швидкість поширення полум'я пожежі було отримано залежність для врахування цієї швидкості на зміну швидкості розповсюдження пожежі

$$\Delta v_{\text{л}} = 5,35 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{2|\Delta P_{\text{с}}|}{\rho_m}}, \quad (6.21)$$

де ρ_m – середньооб'ємна густина середовища для розглядуваної ділянки цеху, яка залежить від середньооб'ємної температури T_c в град. К, кг/м³

$$\rho_m = \frac{354,33}{T_c}. \quad (6.22)$$

Тоді дійсна швидкість $V_{\text{л}}$ поширення полум'я пожежі буде

$$V_{\text{л}} = v_{\text{л}} \pm \Delta v_{\text{л}}. \quad (6.23)$$

У залежності (6.23) знак «+» приймають при переході пожежі з ділянки цеху з надлишковим тиском на ділянку з розрядженням і знак «—» — для протилежного випадку.

Тактико-технічні характеристики пожежних стволів згідно з ДСТУ 2112-92, які використовуються для локалізації і гасіння пожеж класу А, наведено в табл. 6.3.

Правила охорони праці при локалізації і гасінні пожежі зобов'язують кожного пожежника, у разі виникнення в зоні ліквідації пожежі небезпечних чинників, використовувати згідно з наказом № 1342 від 16.12.2011 МНС України газодимозахисне спорядження та захисний одяг.

Таблиця 6.3

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, де переважно 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 заходити у 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 пожежника захистити спеціальним захисним одягом.

Для захисту органів дихання та зору під час роботи в непридатному для дихання середовищі потрібно використовувати апарат на стисненому повітрі SCBA ProffAir APS/4. Захист пожежника від теплової радіації передбачає використання термозахисних костюмів «Індекс-1», «Індекс-3» та «Індекс-1200», які дають змогу працювати при температурі 200°C протягом 15 хв, а термозахисний костюм «Індекс-1200» – за температури 1200 °C до 5 хв.

Для обґрунтованого прийняття рішення про необхідність використання пожежником термозахисного костюма скористаємося залежністю (6.12), на підставі якої визначимо дійсне мінімальне значення теплової радіації $q_{\min}$ в кВт/м² залежно від максимально допустимої відстані пожежника $l_{q\max}$ в м від фронту пожежі при площі пожежі S_{II} в м²

$$q_{\min} = \frac{90\sqrt[3]{S_{II}}}{\sqrt{l_{q\max}^3}}. \quad (6.24)$$

Розглянувши всі основні чинники, 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 у цехах деревообробних виробництв здебільшого використовують воду [181].

При виникненні пожежі черговий обслуговуючий персонал зупиняє роботу верстатів, відсмоктувальної вентиляції та силових електроустаткування. Після цього всіх працівників евакуйовують з приміщення цеху, в якому виникла пожежа, відповідно до евакуаційних планів.

Після приїзду пожежно-рятувальних підрозділів на об'єкт, де виникла пожежа, в процесі їх оперативного розгортання, насамперед потрібно поставити пожежні автомобілі на найближчі вододжерела і розміщувати пожежників зі стволами по фронту поширення пожежі. Крім цього, треба розміщувати пожежників зі стволами B на захист обладнання і покрівлі.

При виникненні пожежі в місцях цеху 1...7 (рис. 6.1) можливі такі варіанти тактики локалізації пожежі:

Тактичний варіант 1. У разі виникнення пожежних ситуацій 1...4 розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по фронту пожежі з внутрішньої протилежної сторони середовища приміщення, в якому немає пожежі.

Тактичний варіант 2. У разі виникнення пожежних ситуацій 5...6 розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по фронту пожежі з правої і лівої сторони середовища приміщення, в яких немає пожежі.

Тактичний варіант 3. У разі виникнення пожежної ситуації 7 розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують за двома протилежно розміщеними фронтами пожежі, яка виникла в центральній частині цеху, з правої і лівої сторони середовища приміщення, в яких немає пожежі.

Крім цього, при виконанні кожного тактичного варіанта потрібно миттєво вводити стволи для захисту на шляхах розповсюдження вогню, для захисту технологічного обладнання, несучих будівельних конструкцій та покрівлі.

Розглянувши всі питання, 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 $I = 1, 2... 7$ – номер можливої пожежної ситуації; 2) наявність пожежних відсіків ξ (у випадку коли $\xi = 1$, пожежні відсіки відсутні; при $\xi = 1,8$ – у цеху розміщені пожежні відсіки); 3) v_l – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/с; 4) швидкість вітру $V_в$, м/с; кут дії вітру $\alpha_в$, град.; ділянка цеху з надлишковим тиском від

вітру приймати « $+\Delta v_L$ », у випадку розрядження – « $-\Delta v_L$ »; 5) тип ствола N_B та $L_{\max}$; тип ствола N_A та $L_{\max}$; 6) тип термозахисних костюмів та апаратів для захисту органів дихання і 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 та гасіння пожежі, кожен з яких вибирають залежно 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

$$\tau_{\text{лок}} + \tau_z \Rightarrow \min; \quad (6.25)$$

за критерієм

$$B = B_o + B_n \Rightarrow \min; \quad (6.26)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq N_B^{\Gamma} \leq b_1; \quad (6.27)$$

$$a_2 \leq N_B^3 \leq b_2; \quad (6.28)$$

$$a_3 \leq N_A \leq b_3; \quad (6.29)$$

$$a_4 \leq \tau_{\text{в.з}} \leq b_4; \quad (6.30)$$

$$a_5 \leq l_q \leq b_5; \quad (6.31)$$

$$p \geq [p], \quad (6.32)$$

де $\tau_{\text{лок}}$ – час локалізації пожежі, хв; τ_z – час гасіння пожежі, хв; значення цих часів визначаємо за залежностями [272]

$$\tau_{\text{лок}} = \frac{6,39 S_{\text{лок}}^{0,893}}{2N_A + N_B^{\Gamma}} K_I K_d; \quad \tau_z = \tau_{\text{лок}} \left(\frac{S_{\Pi}}{S_{\text{лок}}} - 1 \right); \quad (6.33)$$

$S_{\text{лок}}$ – площа локалізації, м^2 ; K_I – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання I_n^{Γ} ($\text{л}/\text{м}^2\text{с}$) 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 $S_{лок} = [2 \frac{V_{II}}{\xi} (\tau_{в.г} - 5)h - h^2] \alpha$; h – глибина подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі ($h = 5$ м для ручних стволів [92]);

$$S_{II} = [25 + (\tau_{в.г} - 10)^2] \frac{V_{II}^2}{\xi^2} \alpha \text{ при } \tau_{в.г} > 10 \text{ хв};$$

$$K_I = 1,62 - 3,04 I_n^{\Gamma}; K_d = 1,4983 - 0,0262 d;$$

α – 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 1м^2 площі об’єкта, на якому виникла пожежа, грн/м²; B_n – витрати пожежно-рятувальних частин, які брали участь в ліквідації пожежі, грн ($B_n = C_B \tau_{л.п}^{-0,8725}$; $C_B = 1,68 \cdot 10^5$ – коефіцієнт пропорційності); $\tau_{л.п} = \tau_{лок} + \tau_г$ – 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 потрапляння досліджуваної i -ї точки в область допустимих розв’язків ($p = k / N$, де k – кількість циклів роботи програми, при яких досліджувані точки потрапили в область допустимих розв’язків; N – загальна кількість циклів роботи програми); $[p]$ – допустиме значення 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 (6.13), (6.14) і (6.18) відповідно. Мінімальне значення обмеження a_4 можна визначити за залежністю

$$a_4 = \frac{60Lk_n}{V_{cl}} + 20,5, \text{ хв} \quad (6.34)$$

де L – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, на якому виникла пожежа, км; k_n – коефіцієнт, який враховує непрямолінійність вуличної мережі (у містобудівельній практиці його максимальне значення приймають $k_n = 1,4$); V_{cl} – середня швидкість руху пожежних автомобілів, км/год (у 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

$$b_4 = \frac{60Lk_n}{V_{cl}} + 29, \text{ хв.} \quad (6.35)$$

Мінімальне значення обмеження a_5 приймаємо 10 м, а максимальне значення $b_5 = L_{\max} - h$.

Для розв'язування оптимізаційної моделі скористаємося методом Монте-Карло [59]. Область допустимих розв'язків, яка визначається обмеженнями (6.27)...(6.31), оточують m -мірним паралелепіпедом, в якому проводимо дослідження. Поставлену задачу найкраще розв'язувати з використанням ПЕОМ. За допомогою давача комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел μ_{ji} в інтервалі $0...1$. Для перетворення псевдовипадкових чисел μ_{ji} , які рівномірно розподілені в інтервалі $0...1$, до

значень N_B^I , N_B^3 , N_A , $\tau_{6.2}$ та l_q використовуємо залежності виду, наприклад, для l_q

$$l_{qi} = a_5 + \mu_{5i}(b_5 - a_5)$$

де μ_{5i} – псевдовипадкове число для визначення чинника l_{qi} на певному i -тому циклі розрахунку.

У процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначаються значення $\tau_{лок}$ і τ_z за залежностями (6.33) та критеріїв B_o і B_n , які перевіряються зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконуються доти, доки буде виконана умова (6.32). Після завершення роботи програми на друк видають такі дані: S_{II} на час початку локалізації; $\tau_{сл}$, V_{II} , $\tau_{лок}$ і τ_z , N_B^I , N_B^3 , 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 і ділянки для захисту об'єкта й обладнання від полум'я пожежі та температури.

6.2.2 На відкритих складах лісо- і пиломатеріалів

Перші кроки щодо визначення вимог до виконання максимального об'єму тактичних робіт на пожежі було розглянуто в роботі [92], що стало основою для прийняття відповідних обмежень під час розроблення математичних моделей для оптимального розміщення сил і засобів локалізації пожежі. Вперше моделювання дій пожежних підрозділів щодо локалізації пожеж у резервуарних парках розглянуто у працях [2, 3]. Стосовно відкритих складів лісоматеріалів деревообробних підприємств подібних математичних моделей, як засвідчив аналіз публікацій, не розробляли. Тому завдання полягає в тому, щоб розробити математичну модель, яка дозволяла б, відповідно до умов пожежі, скласти оптимальний

тактичний план розміщення сил і засобів для локалізації та гасіння пожежі на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств.

На підставі рекомендацій [220] розглянемо план розташування штабелів одного кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання. Згідно із цими рекомендаціями площу кварталу груп штабелів круглих лісоматеріалів слід приймати не більше як 4,5 га. Ширина кожної групи штабелів у кварталі може бути не більша ніж 50 м, а кварталу – не більша за 100 м. Групи штабелів круглих лісоматеріалів у кварталі варто відокремлювати між собою поздовжніми і поперечними розривами. Ширина поздовжніх розривів має бути не менша від полуторної висоти, а поперечних – не менша від 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 потрібно приймати з урахуванням кута природного розсипання штабелів при пожежі, але не менше як 8 м. На підставі розглянутих рекомендацій план розташування штабелів одного кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання зображений на рис. 6.4.

Основні параметри кварталу складу: штабелі згідно з рекомендаціями [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 $20\,586 \text{ м}^2 \approx 2$ га; протипожежні розриви між кварталами при висоті штабелів 6 м дорівнюють 30 м.

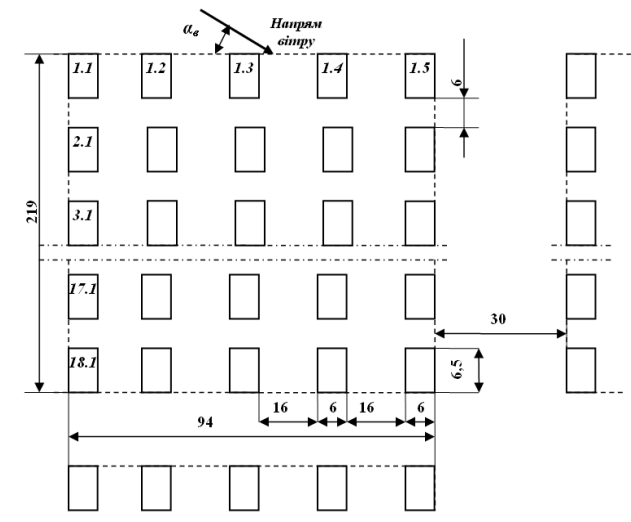


Рис. 6.4. План кварталу складу круглих лісоматеріалів штабельного зберігання

Першочерговим завданням процесу гасіння пожежі є її локалізація, від успішного виконання якої залежить швидкість процесу гасіння. Відомо, що існує багато варіантів розміщення сил і засобів для проведення локалізації. Тому важливо визначити найкращу (оптимальну) позицію їх розміщення. При розміщенні пожежних стволів необхідно враховувати їх місця розташування, які дозволяли б подавати струмінь на потрібну глибину від фронту пожежі. Крім цього, треба брати до уваги можливу довжину рукавної лінії. Важливо й забезпечувати правила охорони праці для пожежників у процесі локалізації і гасіння пожежі.

Математична постановка задачі оптимізації [57, 107]. Для формулювання оптимізаційної задачі необхідно насамперед 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 τ_g у хв. У цьому випадку функція мети буде як сума цих чинників, яка повинна мати мінімальне значення

$$\tau_{лок} + \tau_g \Rightarrow \min . \quad (6.36)$$

Значення цих чинників визначаємо за залежностями [272]

$$\tau_{лок} = \frac{6,39 S_{лок}^{0,893}}{2N_A + N_B^I} K_I K_d; \tau_z = \tau_{лок} \left(\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}} - 1 \right), \quad (6.37)$$

де $S_{лок}$ – площа локалізації, м²; K_I – коефіцієнт, який враховує інтенсивність подання I_n^I (л/м²с) 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 $S_{лок}$, м²

$$S_{лок} = l_{\phi} (h + h_{лок}); \quad (6.38)$$

l_{ϕ} – 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 поздовжніх проїздів між штабелями, м; b_{non} – ширина поперечних проїздів між штабелями, м; n – кількість штабелів, яка охоплена пожежею за час $\tau_{в.з}$ вільного горіння

$$n = \frac{[25 + (\tau_{в.з} - 10)^2] V_{\Pi\epsilon}^2 \alpha}{(b + b_n)(l + b_{non})}; \quad (6.39)$$

$$K_I = 1,62 - 3,04 I_n^I; \quad (6.40)$$

$$K_d = 1,4983 - 0,0262 d; \quad (6.41)$$

α – 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_{Π} – площа пожежі, м²;

$$S_{\Pi} = [25 + (\tau_{\text{в.з}} - 10)^2] V_{\Pi\text{в}}^2 \alpha; \quad (6.42)$$

$V_{\Pi\text{в}}$ – найбільш вірогідна швидкість розповсюдження полум'я по штабелю, м/хв;

$$V_{\Pi\text{в}} = 60 V_{\Pi} K_{\text{в}} K_{\alpha}; \quad (6.43)$$

V_{Π} – швидкість розповсюдження полум'я по штабелю, м/с; $K_{\text{в}}$ – коефіцієнт, який враховує вплив швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я по штабелю

$$K_{\text{в}} = 0,9912 \exp(0,0388 V_{\text{в}}); \quad (6.44)$$

$V_{\text{в}}$ – швидкість вітру, м/с; K_{α} – коефіцієнт, який враховує вплив напрямку дії вектора швидкості вітру на швидкість розповсюдження полум'я по штабелю

$$K_{\alpha} = -5 \cdot 10^{-5} \alpha_{\text{в}}^2 + 0,0123 \alpha_{\text{в}} + 0,374; \quad (6.45)$$

$\alpha_{\text{в}}$ – кут напрямку вітру (при $\alpha_{\text{в}} = 90^\circ$ розглядається попутний напрямок вітру, який збігається з поздовжнім або поперечним розміщенням штабелів кварталу (рис. 6.4) і переміщує пожежу на квартал; при $\alpha_{\text{в}} = 270^\circ$ – зустрічний напрямок вітру; крім цього, при виникненні пожежі по периметру кварталу попутний напрямок вітру необхідно розглядати з тієї з чотирьох сторін кварталу, на якій виникла пожежа; при виникненні пожежі в центрі кварталу потрібно розглядати тільки попутний напрямок вітру), град.; $\tau_{\text{в.з}}$ – тривалість вільного розвитку пожежі, хв.

Для визначення площі пожежі S_{Π} скористаємося 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 зображено на рис. 6.5 [103]. Розмістивши квартал складу лісоматеріалів в системі координат XY (рис. 6.5), визначимо координати розміщення кожної пожежної ситуації: $1(0; L_K)$; $2(B_K; L_K)$; $3(0; 0)$; $4(B_K; 0)$; $5(0,5B_K; L_K)$; $6(0; 0,75L_K)$; $7(B_K; 0,75L_K)$; $8(0; 0,5L_K)$; $9(B_K; 0,5L_K)$; $10(0; 0,25L_K)$; $11(B_K; 0,25L_K)$; $12(0,5B_K; 0)$; $13(0,5B_K; 0,5L_K)$. Для кожної пожежної ситуації залежно від площі пожежі можливі різні тактичні плани розміщення сил і засобів для локалізації та гасіння пожежі.

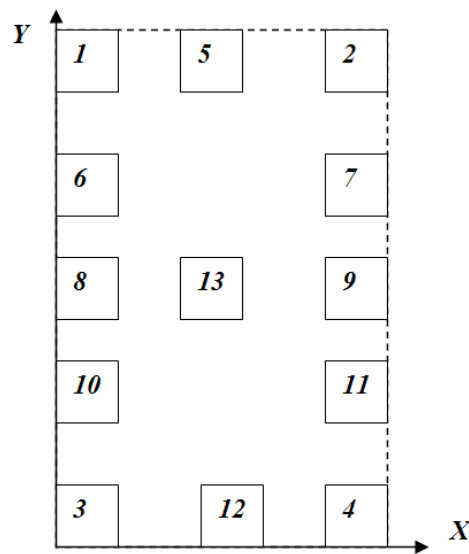


Рис. 6.5. Схема кварталу складу лісоматеріалів деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями

Аналізуючи схему кварталу складу лісоматеріалів (рис. 6.5), можна зауважити, що пожежі на ділянках 1, 2, 3, і 4 є кутівими 90° , на ділянках 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 – кутівими 180° , а на ділянці 13 – кругова 360° .

У цьому випадку площі пожежі можна визначити за залежностями:

- кутова пожежа 90° (ділянки складу: 1, 2, 3, 4, рис. 6.5)

$$S_{II} = 16,67n^{1,18}bl, \text{ м}^2; \quad (6.46)$$

- кутова пожежа 180° (ділянки складу: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, рис. 6.5)

$$S_{II} = 22,29n^{1,34}bl, \text{ м}^2; \quad (6.47)$$

- кругова пожежа 360° (ділянка складу 13, рис. 2)

$$S_{II} = 29,72n^{1,35}bl, \text{ м}^2 \quad (6.48)$$

де n – кількість груп загорянь штабелів залежно від форми пожежі

$$n = \frac{0,25V_{П6}\tau_{6,2}}{\sqrt{\frac{bl + 2h(b+l)}{\alpha}}} \quad (6.49)$$

Визначаємо кількість пожежних стволів для подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі. Для цього скористаємося рекомендаціями роботи [181]. На підставі цих рекомендацій ($Q_B = 3,7$ л/с; $I_n^F = 0,2$ л/м²с) визначаємо кількість стволів B на гасіння (N_B^F) і захист (N_B^3)

$$N_B^F = 0,054S_{II}; \quad N_B^3 = 0,027S_{II}. \quad (6.50)$$

Кількість стволів A (N_A) на локалізацію і гасіння від загальної кількості стволів N_B^F на підставі рекомендацій [92]

$$N_A = 0,3N_B^F. \quad (6.51)$$

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:

$$(N_B^I)_\partial = \frac{N_B^I}{R_c(\tau)}; (N_B^3)_\partial = \frac{N_B^3}{R_c(\tau)}; (N_A)_\partial = \frac{N_A}{R_c(\tau)}; \quad (6.52)$$

$$N_B = (N_B^I)_\partial + (N_B^3)_\partial; \quad (6.53)$$

$$N_\Sigma = (N_B^I)_\partial + (N_B^3)_\partial + (N_A)_\partial. \quad (6.54)$$

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_∂ для ліквідації пожежі

$$N_\partial = 0,25(2(N_A)_\partial + N_B + 0,17N_\Sigma + 2), \quad (6.55)$$

а також загальну кількість пожежних автоцистерн і спеціальних машин:

- пожежних автоцистерн

$$N_{n.a} = N_\partial; \quad (6.56)$$

- спеціальних машин $N_{n.c}$ залежно від загальної кількості працівників N_n , які є на території кварталу складу, де виникла пожежа

$$N_{n.c} = 0,011N_n \geq 1. \quad (6.57)$$

Після розгляду функції мети переходимо до визначення **критерію оптимізації**. За критерій оптимізації вибору тактики локалізації і гасіння пожежі, згідно з рекомендаціями [110], приймаємо втрати як для об'єкта B_o ,

так і для пожежно-рятувальних підрозділів B_n , які повинні бути мінімальними

$$B_o + B_n \Rightarrow \min ; \quad (6.58)$$

$$B_o = C_o V_{Пв}^2 \alpha (\tau_{в.г}^2 - 20\tau_{в.г} + 0,25\tau_{лок}^2 + 125); \quad (6.59)$$

$$B_n = C_n \tau_{з.п.п} N_v ; \quad (6.60)$$

$$\tau_{з.п.п} = \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз} + \tau_{лок} + \tau_г + \tau_{лік}, \quad (6.61)$$

де C_o – вартість одного м² площі об'єкта, яка знищена пожежею, грн/м²; 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; $\tau_{зб}$ – час збору особового складу, хв; $\tau_{сл}$ – час слідування на пожежу, хв;

$$\tau_{сл} = \frac{60Lk_n}{V_{сл}} ; \quad (6.62)$$

L – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, на якому виникла пожежа, км; k_n – коефіцієнт, який враховує не прямолінійність вуличної мережі (у містобудівельній практиці його максимальне значення приймають $k_n = 1,4$); $V_{сл}$ – середня швидкість руху пожежних автомобілів, км/год (у денний час $V_{сл} = 32$ км/год; вночі – до 60 км/год [157]); $\tau_{роз}$ – час оперативного розгортання, хв; $\tau_{лік} = 0,25(\tau_{лок} + \tau_г)$ – час на закінчення ліквідації пожежі (остаточне гасіння), хв.

Значення складових $\tau_{o.o}$, $\tau_{з.с}$, $\tau_{зб}$, $\tau_{роз}$ наведено в 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 $(N_B^r)_o$, $(N_A)_o$ для гасіння і $(N_B^3)_o$ 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 (6.50)–(6.52).

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 аналізу цього чинника за залежністю

$$a_4 = \frac{60Lk_n}{V_{сл}} + 20,5, \text{ хв} \quad (6.63)$$

а максимальне значення обмеження b_4 на $\tau_{в.з}$ приймаємо з урахуванням прогнозованого максимально можливого значення часу вільного горіння

$$b_4 = \frac{60Lk_n}{V_{сл}} + 29, \text{ хв.} \quad (6.64)$$

У процесі ліквідації пожежі кожного пожежника зобов'язують у випадку виникнення в зоні пожежі небезпечних для життєдіяльності чинників використовувати згідно з наказом № 1342 від 16.12.2011 МНС України газодимозахисне спорядження та захисний одяг. Тому наступним обмеженням для ліквідатора пожежі є відстань l_q від фронту

пожежі до пожежника зі стволем, яка забезпечувала б мінімальне значення дії на нього теплової радіації q в кВт/м². 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 пожежника від теплової радіації передбачає використання термозахисних костюмів «Індекс-1», «Індекс-3» та «Індекс-1200», які дозволяють працювати за температури 200 °С впродовж 15 хв, а термозахисний костюм «Індекс-1200» – за температури 1200 °С до 5 хв.

Для визначення значення q було отримано емпіричну залежність на підставі аналізу результатів розрахунків за залежностями для визначення густини теплового потоку за законом Стефана-Больцмана, температури факела полум'я та площі пожежі. За результатами статистичної обробки результатів розрахунків отримано залежність

$$q = \frac{90\sqrt[3]{S_{II}}}{\sqrt{l_q^3}}, \text{ кВт/м}^2. \quad (6.65)$$

На значення l_q встановлюємо обмеження залежно від мінімально можливої відстані пожежника 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.

Розглянувши всі обмеження, 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 використовують головно воду [140]. Тому при прибутті пожежно-рятувальних підрозділів на об'єкт, де виникла пожежа, в процесі їх оперативного розгортання, насамперед потрібно поставити пожежні автоцистерни на найближчі

вододжерела і розгорнути пожежні рукави від вододжерел до осередку пожежі, зокрема від гідрантів кільцевої господарчо-пожежної магістралі високого тиску. При виникненні пожежі в місцях складу 1...13 (рис. 6.5) можливі такі варіанти тактики локалізації пожежі.

Тактичний варіант 1. У разі виникнення пожежних ситуацій 1, 2, 3 і 4 (кутова пожежа 90°) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по периметру фронту пожежі з обов'язковим виділенням стволів *B* на захист сусідніх штабелів від займання, які знаходяться всередині кварталу. Крім цього, необхідно враховувати напрямок вітру. При напрямку вітру на квартал лісоскладу вирішальний напрямок локалізації пожежі повинен бути спрямований проти вітру. Коли немає вітру, сили пожежогасіння можуть бути розміщені рівномірно по периметру фронту пожежі.

Тактичний варіант 2. У разі виникнення пожежних ситуацій 5...12 (кутова пожежа 180°) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по фронту пожежі з обов'язковим виділенням стволів *B* на захист сусідніх штабелів від займання, які знаходяться всередині кварталу. Для спрощення оперативного розгортання половина пожежних автоцистерн повинна бути розміщена на продольних розривах складу на безпечній відстані зі сторони переміщення фронту пожежі та з обов'язковим перекачуванням до них води від вододжерел. При напрямку вітру на квартал лісоскладу вирішальний напрямок локалізації пожежі повинен бути спрямований проти вітру. Коли немає вітру, сили пожежогасіння можуть бути розміщені рівномірно по периметру фронту пожежі.

Тактичний варіант 3. У разі виникнення пожежної ситуації 13 (кругова пожежа 360°) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують за двома протилежно розміщеними фронтами пожежі, яка виникла в центральній частині складу лісоматеріалів, в яких немає пожежі. Захист сусідніх штабелів від займання виконують по всьому периметру пожежі. При цьому більшість стволів *B* 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 безпечній відстані від фронтів пожежі та з обов'язковим перекачуванням до них води від вододжерел. Більшість пожежних автоцистерн повинна бути розміщена на складі на стороні фронту пожежі, який переміщується за напрямком вітру. Коли немає вітру, сили пожежогашіння можуть бути розміщені рівномірно по периметру фронту пожежі.

Крім цього, при виконанні кожного тактичного варіанта потрібно передусім збивати полум'я із зовнішніх поверхонь штабеля, щоб зменшити вплив теплового випромінювання, та одночасно подавати суцільні струмені всередину деревини штабеля з торцевої сторони для їх проливання вогнегасною рідиною.

Розглянувши питання, 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_v , м/с; кут дії вітру α_v , 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 вибирають залежно 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

$$\tau_{\text{лок},i} + \tau_{z,i} \Rightarrow \min; \quad (6.66)$$

за критерієм

$$B_{o,i} + B_{n,i} \Rightarrow \min; \quad (6.67)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq (N_B^I)_{\partial,i} \leq b_1; \quad (6.68)$$

$$a_2 \leq (N_A)_{\partial,i} \leq b_2; \quad (6.69)$$

$$a_3 \leq (N_B^3)_{\partial,i} \leq b_3; \quad (6.70)$$

$$a_4 \leq \tau_{\partial,i} \leq b_4; \quad (6.71)$$

$$a_5 \leq l_{qi} \leq b_5; \quad (6.72)$$

$$p_i \geq [p], \quad (6.73)$$

де p_i – імовірність потрапляння досліджуваної i -ї точки в область допустимих розв’язків ($p_i = k / N$, де k – кількість циклів роботи програми, при яких досліджувані точки потрапили в область допустимих розв’язків; N – загальна кількість циклів роботи програми); $[p]$ – допустиме значення імовірності, від значення якого залежить кількість досліджень для прийняття оптимального значення.

Для розв’язування оптимізаційної моделі скористаємося методом Монте-Карло. Область допустимих розв’язків, яка визначається обмеженнями (6.68)-(6.72), оточують m -мірним паралелепіпедом, у якому проводимо дослідження. Поставлену задачу краще всього розв’язувати з використанням ПЕОМ. За допомогою генератора комп’ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел μ_{ji} в інтервалі $0 \dots 1$. Для перетворення псевдовипадкових чисел μ_{ji} , які рівномірно розподілені в інтервалі $0 \dots 1$, до значень $(N_B^I)_{\partial,i}$, $(N_A)_{\partial,i}$, $(N_B^3)_{\partial,i}$, $\tau_{\partial,i}$ та l_{qi} використовуємо залежності виду, наприклад, як для l_{qi}

$$l_{qi} = a_5 + \mu_{5i}(b_5 - a_5),$$

де μ_{5i} – псевдовипадкове число для визначення чинника l_{qi} на певному i -тому циклі розрахунку.

У процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначають значення $\tau_{лок,i}$ і $\tau_{г,i}$ за залежностями (6.37) та критеріїв $B_{o,i}$ і $B_{n,i}$, які порівнюють зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконують доти, доки буде виконана умова (6.73). Після завершення роботи програми на друк видають такі дані: $S_{Пi}$ 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) $(N_B^T)_{\partial,i}$, $(N_A)_{\partial,i}$, $(N_B^3)_{\partial,i}$, l_{qi} , q_i , p_i ; тип апарату для захисту органів дихання та зору; тип термозахисного одягу; тактичний варіант локалізації і гасіння пожежі.

6.3 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. Під час розгляду 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 зображено на рис. 6.6 [125].



Рис. 6.6. Фрагмент поверхонь штабеля круглого лісоматеріалу

Штабелі пиломатеріалів можуть бути укладені двома способами: 1) з утворенням зазорів між шарами пиломатеріалів (рис. 6.7, *а*); 2) без зазорів між шарами пиломатеріалів (рис. 6.7, *б*).

При охолодженні поверхонь штабеля суцільний струмінь води, який виходить з насадки ствола, розпилюється і падає на бокову поверхню у диспергованому вигляді. Після зіткнення з поверхнею штабеля вода розбризкується в різні боки, частково заходить всередину штабеля, а залишок води стікає вниз по боковій поверхні штабеля. Наближено вважатимемо, що вода при стіканні утворює смугу шириною $b_{ох}$, яка й охолоджує зовнішню поверхню деревини штабеля. Зовнішній нагляд за сходженням смуги води показав, що її ширина коливається в межах 0,7...1,2 м. Для проведення розрахунків приймаємо ширину водної смуги стікання для охолодження поверхонь штабеля $b_{ох} = 0,8$ м.



а



б

Рис. 6.7. Фрагменти поверхонь штабелів пиломатеріалів: *а* – з утворенням зазорів між шарами; *б* – без утворення зазорів (торцева поверхня штабеля)

Потрібно визначити довжину шляху водної смуги при її опусканні з найвищої точки штабеля h до початку кипіння, тобто значення y_k . Для цього

необхідно визначити товщину водної смуги δ , швидкість її опускання $v_{\text{в.н}}$ та коефіцієнт тепловіддачі α_m .

Товщину водної смуги δ визначаємо за залежністю [18]

$$\delta = 0,3076 \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} Re^{0,6}, \quad (6.74)$$

де v – кінематична в'язкість води за температури 20 °C; $v = 1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
 g – прискорення вільного падіння; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; Re – число Рейнольдса; для
 ствола А $Re = 9000$, для ствола В $Re = 4226$.

Після підстановки числових значень в залежність (6.74) товщина
 плівки знаходиться в межах $\delta = 2,2 \dots 3,5 \text{ мм}$.

Швидкість опускання водної смуги визначаємо за залежністю [18]

$$v_{\text{в.н}} = \frac{V_c k_e}{b_{\text{ох}} \delta}, \quad (6.75)$$

де V_c – розхід води стволом, $\text{м}^3/\text{с}$; k_e – коефіцієнт, який враховує ефективність
 використання води, тобто яка частина води іде на утворення водної смуги
 (попередньо приймаємо $k_e = 0,5$).

Після підстановки в залежність (6.75) числових значень отримуємо $v_{\text{в.н}}$
 $= 0,77 \dots 1,54 \text{ м/с}$.

Коефіцієнт тепловіддачі визначаємо за залежністю [18]

$$\alpha_m = 0,0946 \lambda \left(\frac{g}{v^2} \right)^{1/3} Re^{0,2} Pr^{0,4}, \quad (6.76)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності для води за температури 20 °C; $\lambda =$
 $5990 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; Pr – число Прандтля (для води за температури 20 °C $Pr = 7,02$).

Після підстановки в залежність (6.76) числових значень отримуємо $\alpha_m = 19,5 \text{ кВт/м}^2\text{К}$ для ствола А і $14,8 \text{ кВт/м}^2\text{К}$ для ствола В.

Довжину шляху водної смуги до початку кипіння визначаємо за залежністю [18]

$$y_k = v_{e.n} \frac{\delta \rho c_p}{\alpha_m} \ln \frac{T_c - T_0}{T_c - T_k}, \quad (6.77)$$

ρ – густина води, кг/м^3 ; ($\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$); c_p – теплоємність води, $\text{кДж/кг}\cdot\text{К}$ ($c_p = 4,183 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$); T_c – температура зовнішньої поверхні деревини штабеля, К ; T_0 – температура зовнішнього середовища, К ; T_k – температура кипіння води, К .

Після підстановки в залежність (6.76) числових значень отримуємо $y_k = 0,8 \text{ м}$ при $T_c = 150^\circ\text{C}$ та $y_k = 0,5 \text{ м}$ 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

$$I_c = \frac{V_c k_e}{b_{ox}}. \quad (6.78)$$

Аналізуючи залежність (6.78), можна зауважити, що зі збільшенням подачі стволами води на бокові поверхні штабелів та збільшенням коефіцієнта, який враховує ефективність використання води, ефективність охолодження зростає. Це можна пояснити тим, що збільшується передача кількості тепла більшій кількості стікаючої води. Тому потрібно встановити можливість збільшити насамперед значення коефіцієнта k_e до максимально можливого значення завдяки визначенню оптимального кута напрямку подачі суцільного струменя ствола на охолодження бокових поверхонь штабеля.

Ефективність використання води при охолодженні бокових поверхонь штабелів. У процесі охолодження вода, яка напрямлена зі ствола на бокові поверхні штабеля, частково входить всередину штабеля, частково відбивається від поверхні, а залишок стікає по боковій поверхні штабеля й охолоджує її. Стоїть задача визначити оптимальний кут напрямку подачі струменя води на бокову поверхню штабеля, який забезпечив би найбільше значення коефіцієнта k_e . Для розв'язування цієї задачі було виконано комплекс експериментальних досліджень з використанням штабелів круглого лісоматеріалу та пиломатеріалів (додаток Д). Воду на поверхню штабеля подавали за допомогою ручного ствола В з насадкою 13 мм при напорі 0,4 МПа з відстані $l_c = 5$ м. Для збирання води, яка стікала з бокової поверхні штабеля й охолоджувала її, використовували спеціальну ємність, ширина якої забезпечувала тільки прийом води з поверхні штабеля, а довжина – утримання об'єму води тільки на охолодження поверхні штабеля впродовж часу $\tau = 20$ с до 70 л. Схему проведення експериментальних досліджень зображено на рис. 6.8.

Виконання експерименту полягає в такому. 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.

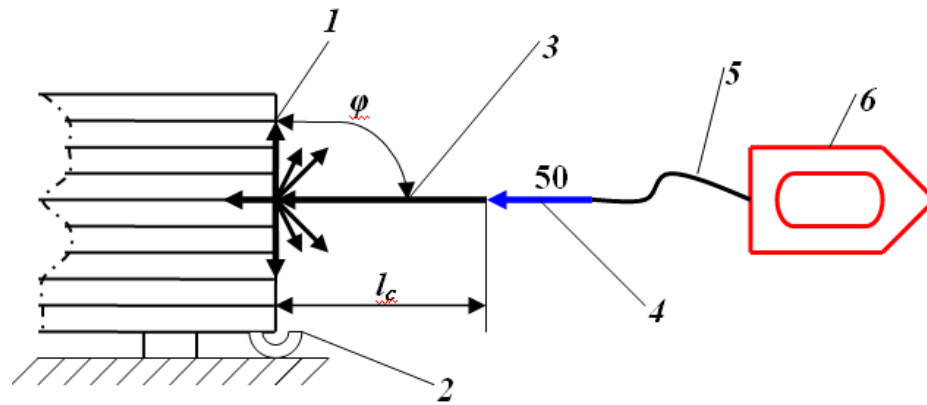


Рис. 6.8. Схема проведення експериментальних досліджень для визначення коефіцієнта ефективності використання води для охолодження: 1 – торець штабеля пиломатеріалів (рис. 6.7, б) (вид збоку); 2 – ємність для збирання води; 3 – суцільний струмінь води; 4 – пожежний ствол; 5 – пожежний рукав; 6 – пожежна автоцистерна

Тоді коефіцієнт ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів дорівнює

$$k_e = \frac{V_e}{V_c}. \quad (6.79)$$

Коефіцієнт ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів визначатимемо при різних кутах φ 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, визначатимемо 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 $\varphi = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 90^\circ$. Кожен дослід повторювали тричі. Тривалість подачі суцільного струменя із пожежного ствола на кожному досліді $\tau = 10$ с. Об'єм води з ємності 2 (рис. 6.8) вимірювався за допомогою тариуваних відер.

За результатами кожного з трьох експериментів визначалося середнє значення, яке використовували для побудови графічних залежностей та їх аналізу.

Результати досліджень для визначення впливу кута φ подачі суцільного струменя на коефіцієнт k_e ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів круглого лісоматеріалу зображено на рис. 6.9.

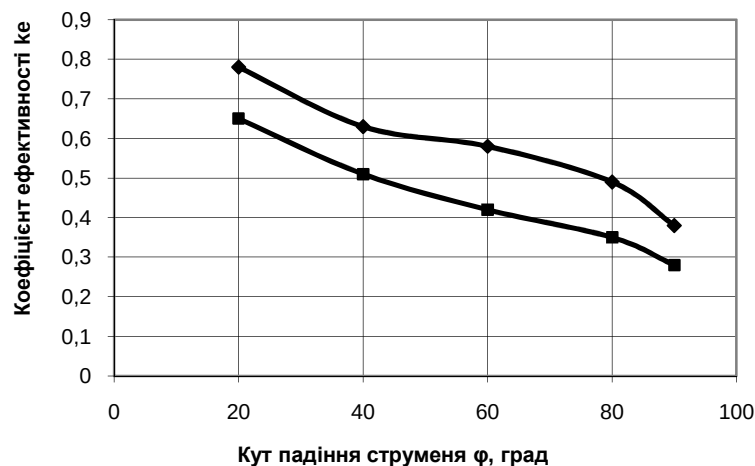


Рис. 6.9. Вплив кута φ подачі суцільного струменя на коефіцієнт k_e ефективності використання води при охолодженні бокових поверхонь штабеля круглого лісоматеріалу: ряд 1 – з торця штабеля; ряд 2 – вздовж довгої осі лісоматеріалу

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 у значеннях коефіцієнтів ефективності використання води пояснюється тим, що при охолодженні торцевої поверхні штабеля плоскі поверхні зрізу круглого лісоматеріалу утворюють кращі умови для створення водної смуги. При охолодженні бічної поверхні штабеля вздовж довгої осі лісоматеріалу

його конструктивна особливість сприяє умовам для розливу води всередину штабеля, що зменшує злив води по водній смузі.

Наступні дослідження проводили на штабелях пиломатеріалів. Результати цих досліджень для визначення впливу кута φ подачі суцільного струменя на коефіцієнт k_e ефективності використання води для захисту від нагрівання штабелів пиломатеріалів, які складені без утворення зазорів між шарами деревини, зображено на рис. 6.10.

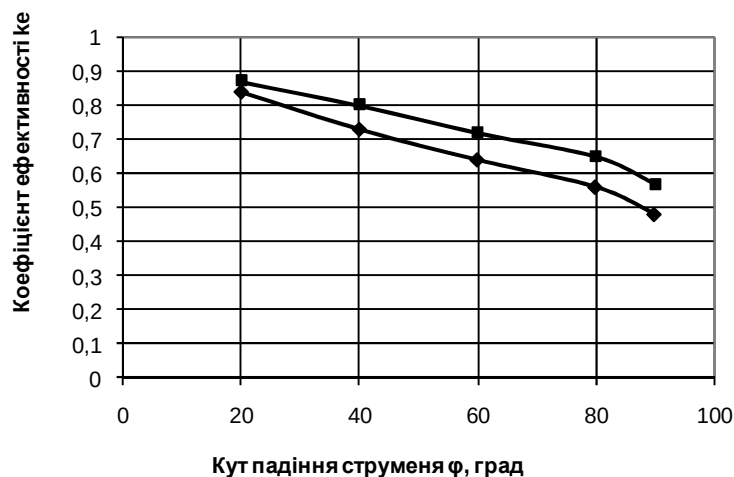


Рис. 6.10. Вплив кута φ подачі суцільного струменя на коефіцієнт k_e ефективності використання води при охолодженні бокових поверхонь штабеля пиломатеріалів, які складені без утворення зазорів між шарами деревини: ряд 1 – з торця штабеля; ряд 2 – вздовж довгої осі пиломатеріалу

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 φ виникають кращі умови для переміщення води по поверхні завдяки ковзанню з одночасним зменшенням її розбризкування. Одночасно значення коефіцієнта k_e є більшим при охолодженні штабеля зі сторони довгої осі пиломатеріалу. Пояснити це можна тим, що на торцевій поверхні є більше щілин для проходження води всередину штабеля (рис. 6.7, б) ніж на стороні штабеля довгої осі пиломатеріалу.

При дослідженні процесу охолодження штабелів пиломатеріалу, в яких деревина укладена із зазорами між її шарами (рис. 6.7, *a*), було встановлено, що значення коефіцієнта k_e є меншим порівняно із штабелями, які укладені без зазорів між шарами деревини (рис. 6.11). Пояснюємо це тим, що наявність зазорів дає змогу значній кількості води потрапляти всередину штабеля.

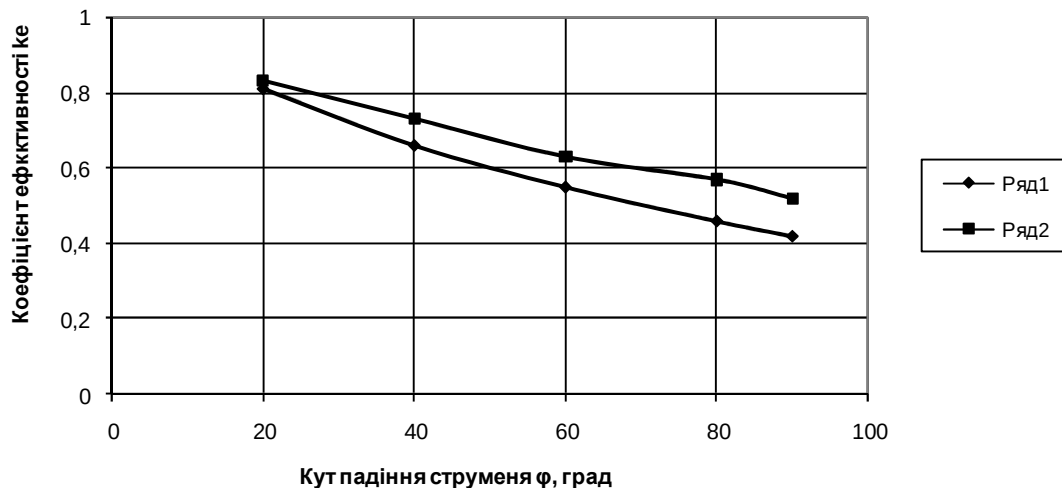


Рис. 6.11. Вплив кута φ подачі суцільного струменя на коефіцієнт k_e ефективності використання води при охолодженні бокових поверхонь штабеля пиломатеріалів, які складені з утворенням зазорів між шарами деревини: ряд 1 – з торця штабеля; ряд 2 – вздовж довгої осі пиломатеріалу

Підсумовуючи отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень, приходимо до висновку, що для забезпечення якісного охолодження поверхонь штабелів, які розміщені зі сторони фронту пожежі, необхідно подавати суцільний струмінь води під кутом не більше як 20° 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 водної смуги починається на довжині її шляху в межах $0,5 \dots 0,8$ м.

6.4 Алгоритми розв'язку задач по визначенню оптимальних тактичних методів локалізації та гасіння пожежі

6.4.1 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 пожежні ситуації та види пожеж, які можуть виникнути в процесі виконання всіх планових робіт. У цьому випадку скористаємося схемою приміщення цеху, яку зображено на рис. 6.1, але для зручності розгляду цього питання продублюємо цю схему на рис. 6.12.

Розмістивши приміщення цеху в системі координат XY (рис. 6.12), 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 напрямок і швидкість вітру на приміщення цеху (рис. 6.3) та значення аеродинамічного коефіцієнта (табл. 6.2). Відтак перейдемо до визначення вхідних даних.

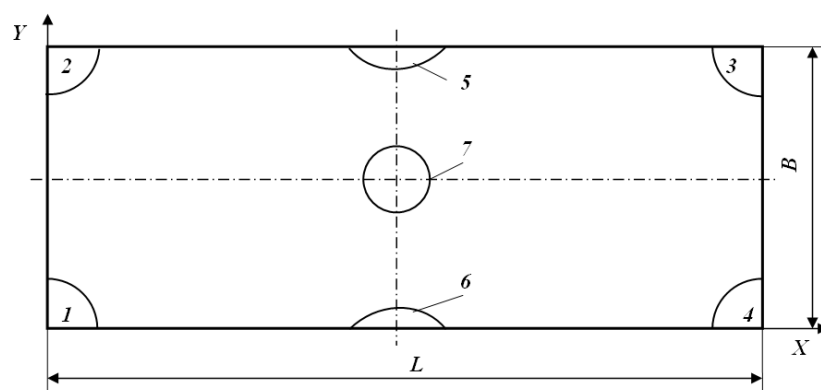


Рис. 6.12. Схема приміщення цеху деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями і формами площі пожежі: 1, 2, 3, 4 – кутова форма (90°) $\alpha = 0,785$ рад.; 5, 6 – кутова форма (180°) $\alpha = 1,57$ рад.; 7 – кругова (360°) $\alpha = 3,14$ рад.

Вхідні дані: 1) координата пожежі $I(x; y)$, де $I = 1, 2 \dots 7$ – номер можливої пожежної ситуації; 2) наявність пожежних відсіків ξ (у разі відсутності пожежних відсіків $\xi = 1$; за наявності в цеху пожежних відсіків $\xi = 1,8$); 3) v_d – лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/с; 4) швидкість вітру V_v , м/с; кут дії вітру α_v , 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 вибирають залежно від координати пожежі $I(x; y)$ в цеху; 8) значення обмежень a_i і b_i , які потрібно визначити заздалегідь; 9) $[p]$ – допустиме значення імовірності для прийняття оптимального значення функції мети.

Блок 1. Введення вхідних даних (рис. 6.13).

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 пожежника від фронту пожежі.

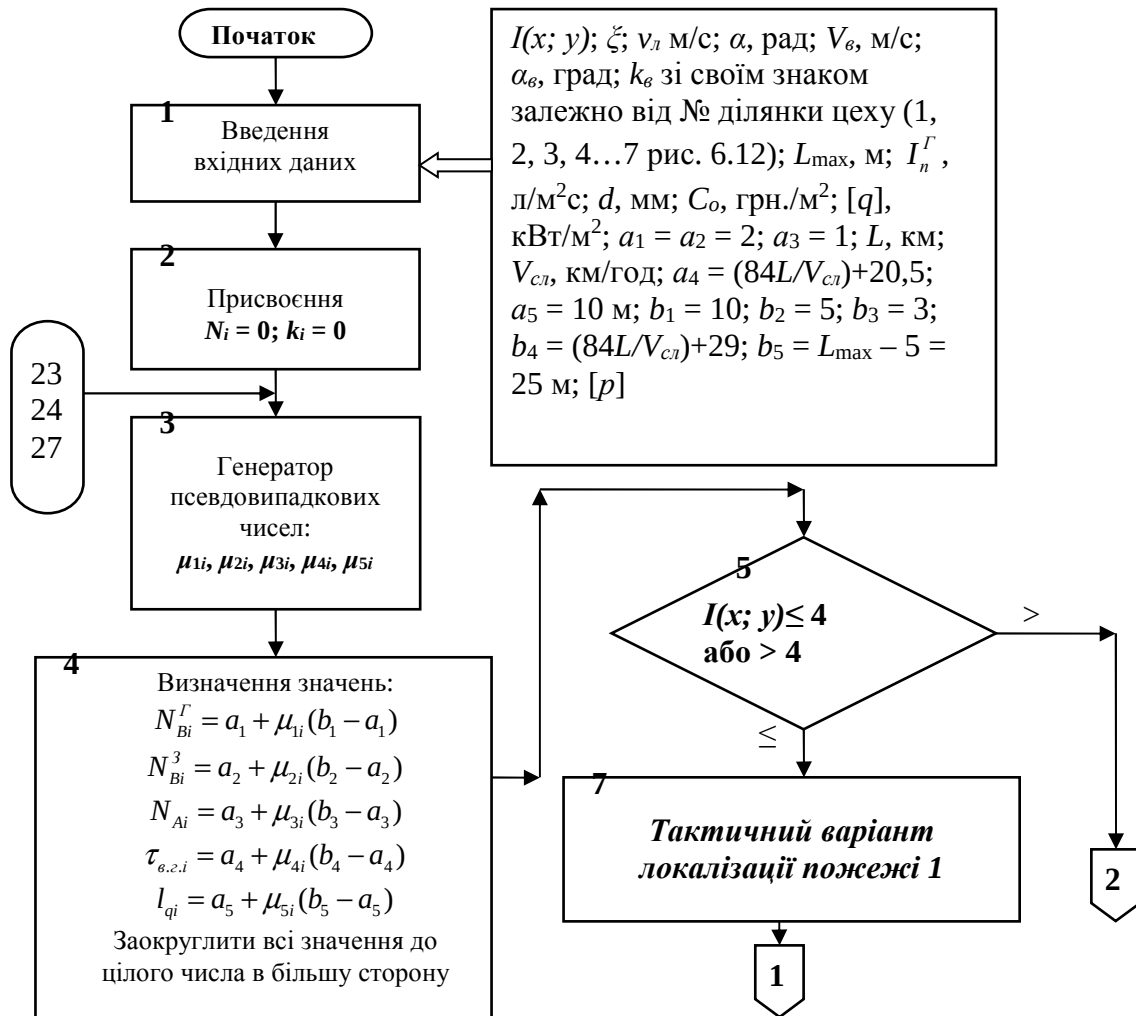


Рис. 6.13. Початок блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

Блоки 5, 7 та 6, 8, 9 (рис. 6.14) призначені для визначення тактичного варіанта локалізації пожежі.

Блоки 10...16 призначені для визначення швидкості розповсюдження пожежі $V_{\text{п}}$ у приміщенні цеху (рис. 6.14).

Блок 17. Присвоєння номера циклу роботи програми (рис. 6.15).

Блок 18. Визначається площа локалізації і пожежі.

Блоки 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.

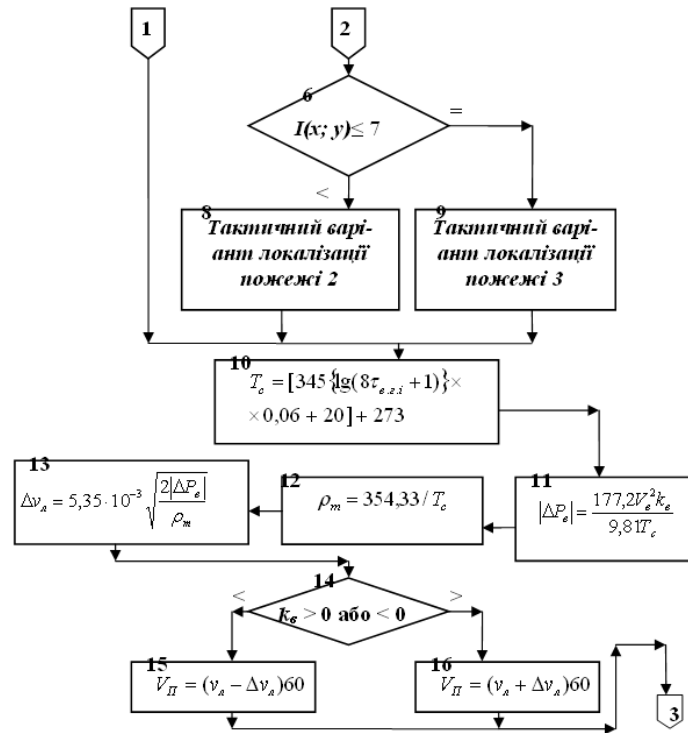


Рис. 6.14. Продовження блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

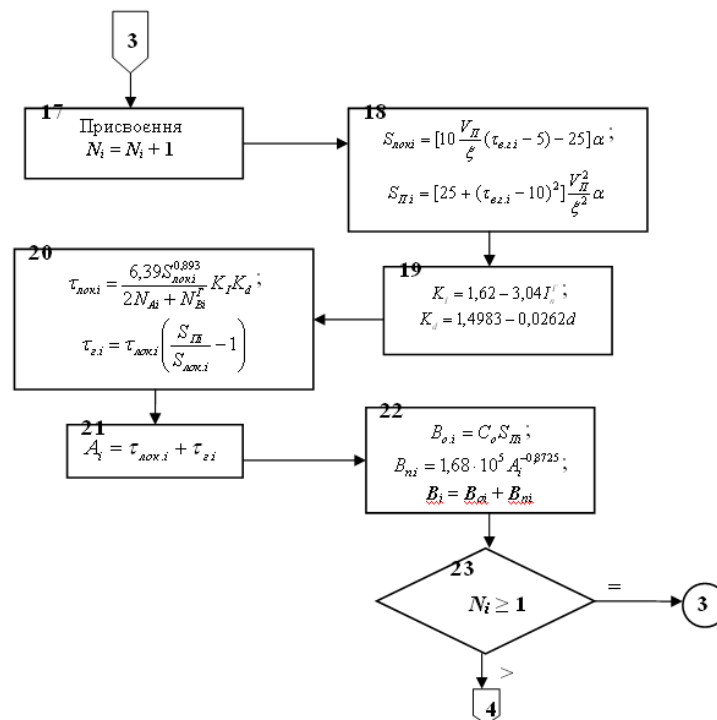


Рис. 6.15. Продовження блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

Блок 23. Визначається номер циклу роботи програми.

Блок 24. Виконується перевірка функції мети і критерію оптимізації (рис. 6.16).

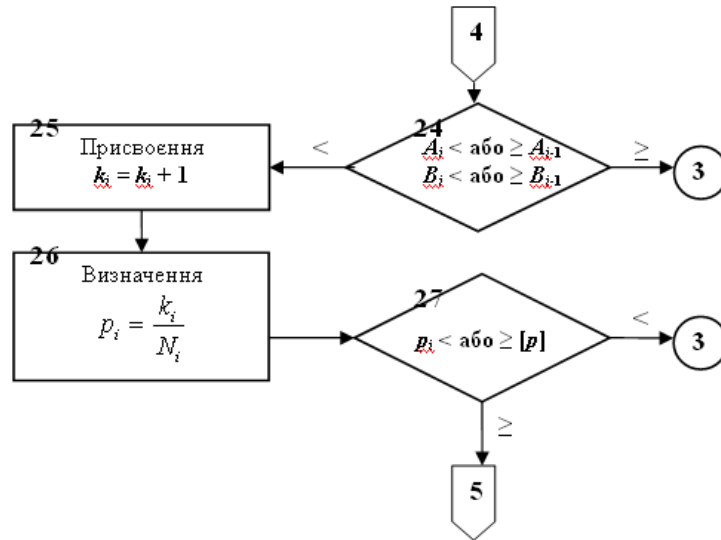


Рис. 6.16. Продовження блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

Блок 25. Виконується присвоєння номера циклу, який пройшов в область допустимих розв'язків.

Блок 26. Визначається значення імовірності потрапляння досліджуваного значення в область допустимих розв'язків.

Блок 27. Перевіряється значення імовірності з допустимим. При забезпеченні умови виконується перехід до блоку 28 (рис. 6.17).

Блок 28. Визначається густина теплового потоку.

Блоки 29, 30, 31. Виконується вибір захисного одягу пожежнику.

Блок 32. Роздрук результатів розв'язування оптимізаційної задачі.

Для реалізації оптимізаційної моделі було розроблено для ПЕОМ пакет прикладних програм на мові С# для роботи в середовищі Windows XP (додаток А4) [117]. Час роботи ПЕОМ становив 5-7 с для 5 тисяч випробувань (N_i – циклів) при імовірності потрапляння досліджуваної i -ї

точки в область допустимих розв'язків $p = 0,9 \dots 0,94$. Робоче вікно програми зображено на рис. 6.18.

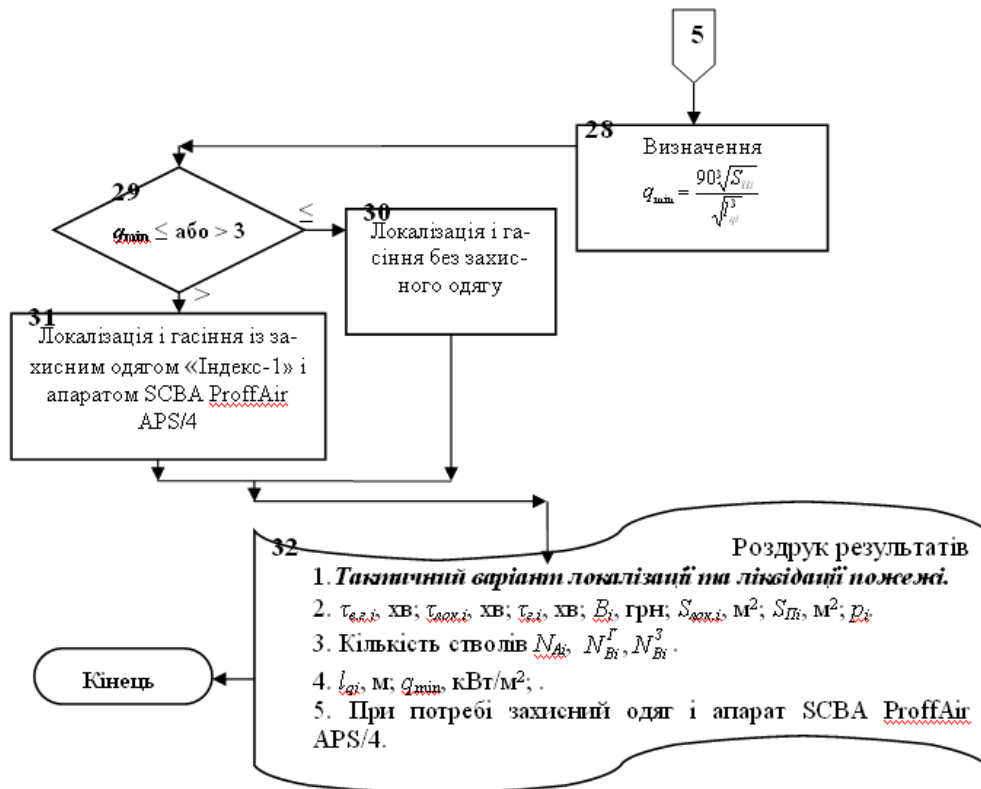


Рис. 6.17. Закінчення блок-схеми алгоритму вибору оптимальної тактики локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

Вхідні дані:

Координати пожежі I =	2	Швидкість вітру v =	4 м/с
☐ Пожежні відсіки		номер ділянки	2
Лнійна шв розпов. пожежі V _л =	0,022	Кут дії вітру Alr =	45 град
Швидкість спідувани V _ш =	32 м/с	Відстань L =	1,5 км
Alr =	0,785 рад	Інтенсивність L _{ai} =	0,2 л/м²
Діаметер насадки d =	16 мм	Вартість C _o =	2500 грн./м²
Тепловий потік q =	3 кВт/м²	Допустиме знач p =	0,9
Обмеження a ₁ =	2	Обмеження b ₁ =	10
Обмеження a ₂ =	2	Обмеження b ₂ =	5
Обмеження a ₃ =	1	Обмеження b ₃ =	3
Обмеження a ₄ =	24,4375	Обмеження b ₄ =	32,9375
Обмеження a ₅ =	10	Обмеження b ₅ =	25

Вихідні дані:

Результати:
 Локалізація і гасіння із захисним одягом «Індекс-1»
 Тактичний варіант локалізації пожежі 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.
 Час локалізації t_{лок} = 71,282 хв
 Час гасіння t_г = 90,387 хв
 Витрати B_i = 1354576,277 грн
 Площа локалізації S_{лок} = 238,55 м²
 Площа пожежі S_p = 541,036 м²
 p_i = 0,9
 Кількість стовпів A NAI = 3
 Кількість стовпів B гасіння NABI = 7
 Кількість стовпів B захист NCBI = 4
 q_{min} = 6,237

Рис. 6.18. Робоче вікно програми для визначення тактичного варіанта локалізації і гасіння пожежі в закритому приміщенні цеху

Розглянувши блок-схему алгоритму розв'язку задачі з оптимізації тактики ліквідації пожежі в закритому приміщенні цеху деревообробного

підприємства, виконаємо з використанням програмного забезпечення дослідження тривалості ліквідації пожежі.

Приклад. У деревообробному цеху виникла кутова пожежа з координатою $2(0; B)$ (рис. 6.12); у цеху розміщені пожежні відсіки $\xi = 1,8$; лінійна швидкість розповсюдження пожежі $v_l = 0,022$ м/с; $\alpha = 0,785$ рад.; швидкість вітру $V_6 = 4$ м/с; напрямок вітру на будівлю цеху $\alpha_6 = 45^\circ$; коефіцієнт, який враховує вплив вітру на осередок приміщення цеху $k_6 = 0,36$; максимальна довжина суцільного струменя води з пожежного ствола $L_{\max} = 30$ м; інтенсивність подачі води на ліквідацію пожежі $I_n^r = 0,2$ л/м²с; діаметр насадки ствола $d = 16$ мм; вартість одиниці площі об'єкта $C_o = 2500$ грн/м²; допустиме значення густини теплового потоку $[q] = 3$ кВт/м²; $a_1 = a_2 = 2$; $a_3 = 1$; відстань від пожежного депо до об'єкта $L = 1,5$ км; швидкість слідування $V_{cl} = 32$ 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; $[p] = 0,9$.

Отриманий результат після введення вхідних даних у робоче вікно програми та її запуску зображено на рис. 6.19.

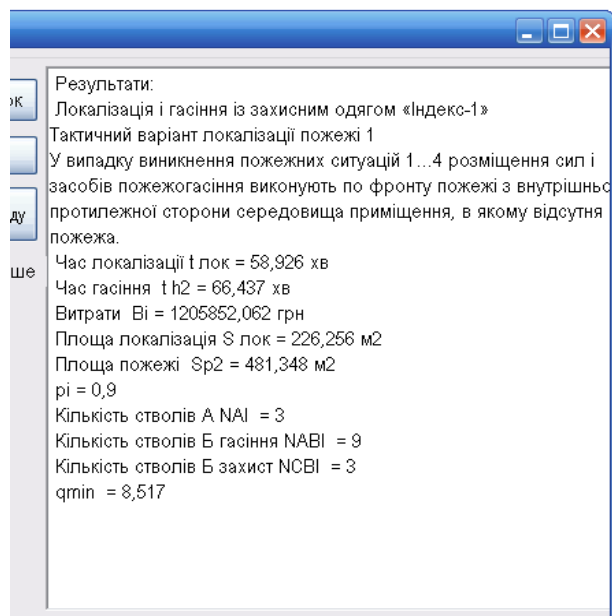


Рис. 6.19. Роздрук оптимального результату для проведення локалізації і гасіння пожежі в цеху деревообробного підприємства

6.4.2 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 скористаємося рис. 6.5, на якому зображено схему кварталу складу лісоматеріалів деревообробного підприємства з можливими пожежними ситуаціями. Розроблення блок-схеми алгоритму починаємо з блоку для введення вхідних даних (рис. 6.20).

Вхідні дані: $I(x; y)$; α , рад; V_{II} , м/с; α_e , град.; V_e , м/с; I_n^r , л/м²с; d , мм; тип ствола N_B та $L_{\max}$, м; тип ствола N_A та $L_{\max}$, м; C_o , грн/м²; C_n , грн/хв; $\tau_{o,o} = \tau_{z,b} = 1$ хв; $\tau_{z,c} = 3$ хв; L , км; V_{cl} , км/год; $\tau_{cl} = (84L/V_{cl})$, хв; $\tau_{poz} = 7$ 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_c , м; b , м; l , м; h , м; $R_c(\tau)$; кількість працівників на кварталі складу N_n ; $[p]$.

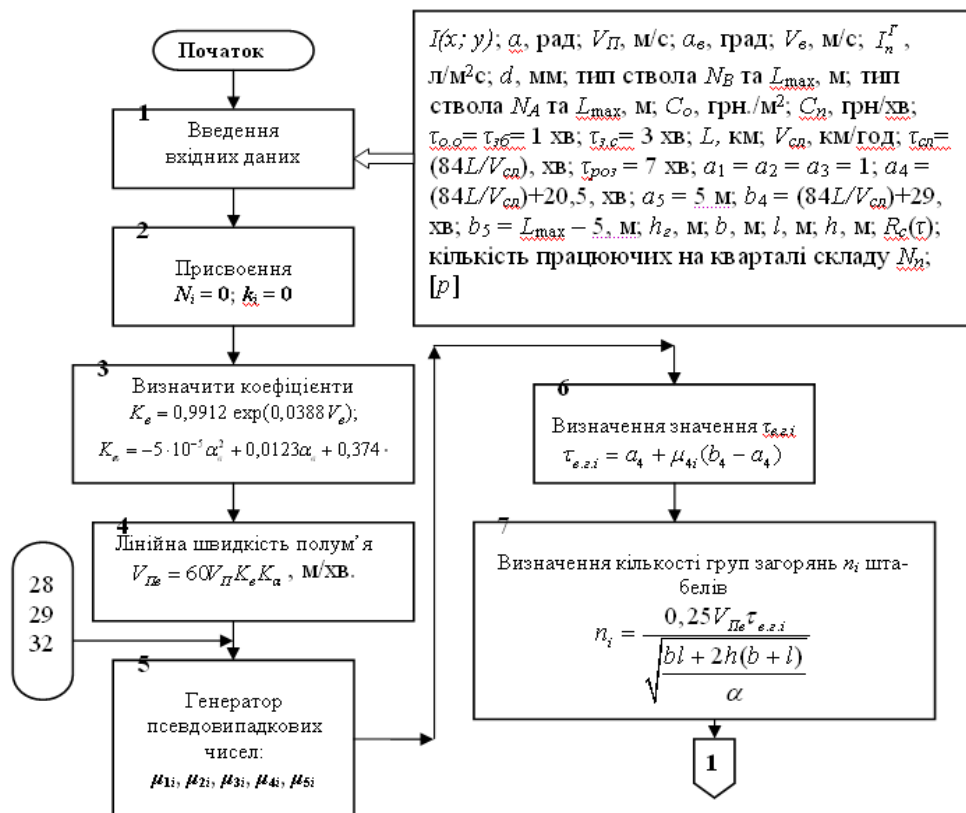


Рис. 6.20. Блок-схема алгоритму для введення вхідних даних, визначення лінійної швидкості розповсюдження пожежі, генерації псевдовипадкових чисел, визначення значення $\tau_{e,z,i}$ та визначення кількості груп загорянь штабелів

Продовження блок-схеми алгоритму зображено на рис. 6.21.

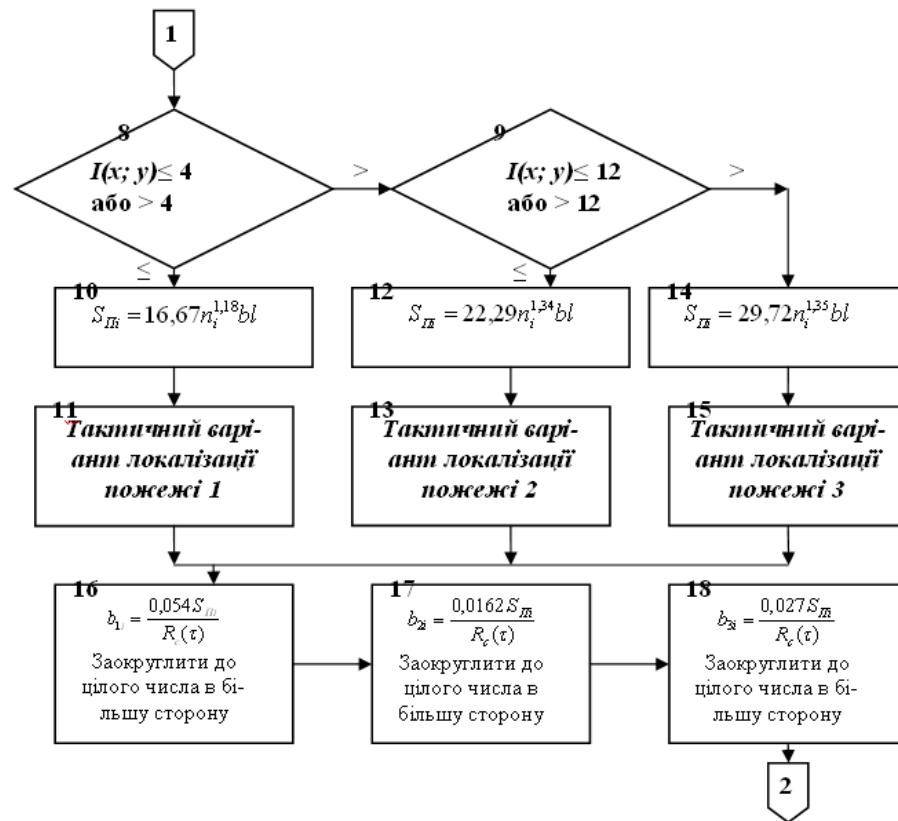


Рис. 6.21. Продовження блок-схеми алгоритму для розрахунку площі пожежі, вибору тактичного варіанта локалізації пожежі та обмежень

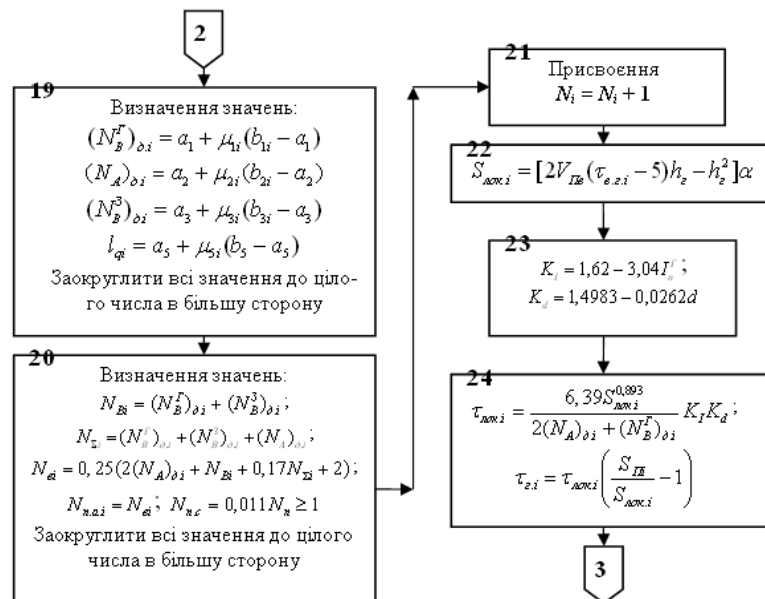


Рис. 6.22. Блок-схема алгоритму для визначення кількості пожежних стовбів, відділень, пожежних автомобілів та часу локалізації і гасіння пожежі

Визначення імовірності потрапляння досліджуваної точки в область допустимих розв'язків, вибір захисного одягу та роздрук результатів зображено на рис. 6.24.

Для реалізації оптимізаційної моделі було розроблено для ПЕОМ пакет прикладних програм на мові С# для роботи в середовищі Windows XP (додаток А5) [118]. Час роботи ПЕОМ становив 5-7 с для 5 тисяч випробувань (N_i – циклів) при імовірності потрапляння досліджуваної i -ї точки в область допустимих розв'язків $p = 0,9...0,94$. Робоче вікно програми зображено на рис. 6.25.

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./м2
Інтенсивність пожежогасіння $L_{ai} =$	0.2 л/м2с	Вартість $C_n =$	67 грн./хв
Діаметр насадка d =	16 мм	Швидкість слідкування $V_{ai} =$	32 км/год
Відстань L =	2 км	Тривалість розгортання t roz =	7 хв
Тривалість слідкування $T_{cp} =$	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

Кнопки: Розрахунок, Дані з прикладу, Очистити, Детальніше, Вихідні дані

Вихідні дані:

Показання гасіння без захисного одягу

Результати

Тактичний варіант локалізації пожежі 1

У випадку виникнення пожежних ситуацій 1, 2, 3 і 4 (кутова пожежа 50%) розміщення сил і засобів пожежогасіння виконують по периметру фронту пожежі з обох боків виділенним стволом Б на захист складів штабелів від займання, які знаходяться в середній частині кварталу. Крім цього, необхідно враховувати напрям вітру. При напрямі вітру на квартал лісо-складу, то вирішальний напрямком локалізації пожежі повинен бути спрямований проти вітру. При відсутності вітру сили пожежогасіння можуть бути розміщені рівномірно по периметру фронту пожежі.

2. Тривалість слідкування $t_{ol} = 7.35$ хв

Тривалість вільного горіння $T_{op} = 5.25$ хв

Витрати $Boi = 83446$ грн

$B = 37285.944829153$

Площа локалізування $S_{loki} = 15$ м2

Площа пожежі $S_{pi} = 37.93$ м2

Імовірність $p_i = 0.5$

3. Стволи на гасіння РСП-70 1 шт

Стволи на гасіння РСП-50 3 шт

4. Кількість водопітків $N_v = 12$ шт

5. Відстань до фронту $l_z = 24$ м

Тепловий потік $q = 2.57189515970058$ кВт/м2

Рис. 6.25. Робоче вікно програми для визначення тактичного варіанта локалізації і гасіння пожежі на відкритих складах лісоматеріалів

Після розгляду блок-схеми алгоритму розв'язку задачі з 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. 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 $20\,586$ м². Пожежа виникла в ситуації

2(94; 219) (рис. 6.5). Використовуючи блок-схему алгоритму (рис. 6.20) вводим в *блок 1* вхідні дані: координата пожежі 2(94; 219); $\alpha = 0,785$ рад.; лінійна швидкість розповсюдження полум'я пожежі $V_{\Pi} = 0,0585$ м/с; кут дії вітру $\alpha_{\theta} = 270^{\circ}$; швидкість вітру $V_{\theta} = 4$ м/с; $I_n^r = 0,2$ л/м²с; $d = 16$ мм; тип ствола **B РСП-50** $L_{\max} = 30$ м; тип ствола **A РСП-70** $L_{\max} = 30$ м; $C_o = 2200$ грн/м²; $C_n = 67$ грн/хв; $\tau_{o.o} = \tau_{3\theta} = 1$ 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; $h_2 = 5$ 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 було отримано такий результат:

1. Тактичний варіант 1.

2. $\tau_{cl} = 7,35$ хв, $\tau_{в.з.} = 26,6$ хв, $\tau_{лок} = 15,63$ хв, $\tau_2 = 22,67$ хв, $B = 94\ 165,23$ грн, $S_{лок} = 14,96$ м², $S_{\Pi} = 36,66$ м², $p = 0,9$.

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/м².

6.5 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 наявними методами ліквідації пожежі розглянемо приклад ліквідації пожежі в сушильному приміщенні деревообробного цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2» (м. Київ, Голосіївський район, вул. Набережно-Корчуватська, 136) [16].

Повідомлення про пожежу надійшло 8 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 людину особового складу. Пожежу локалізували о 14 год 30 хв та ліквідували о 15 год. 42 хв. Площа пожежі становила 2000 м². Матеріальні збитки склали близько 11 млн 151 тис. грн. Фрагмент ліквідації пожежі в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2» зображено на рис. 6.26.



Рис. 6.26. Фрагмент ліквідації пожежі в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2»

Для проведення порівняльного аналізу вводимо в розроблену систему дані щодо пожежі в сушильному приміщенні деревообробного цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2».

Вхідні дані. У сушильному приміщенні виникла кутова пожежа з координатою $5(0,5L; B)$ (рис. 6.12); у приміщенні немає пожежних відсіків $\xi = 1$; лінійна швидкість розповсюдження пожежі $v_n = 0,022$ м/с; $\alpha = 1,57$ рад.; швидкість вітру $V_g = 4$ м/с; напрямок вітру на будівлю цеху $\alpha_g = 90^\circ$; коефіцієнт, який враховує вплив вітру на осередок приміщення цеху $k_g = 0,66$; максимальна довжина суцільного струменя води з пожежного ствола

$L_{\max} = 30$ м; інтенсивність подачі води на ліквідацію пожежі $I_n^r = 0,2$ л/м²с; діаметр насадки ствола $d = 16$ мм; вартість одиниці площі об'єкта $C_o = 5500$ грн/м²; допустиме значення густини теплового потоку $[q] = 3$ кВт/м²; $a_1 = a_2 = 2$; $a_3 = 1$; відстань від пожежного депо до об'єкта $L = 3$ км; швидкість слідування $V_{сл} = 60$ 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; $[p] = 0,9$.

Отриманий результат після введення вхідних даних в систему і розрахунку наведено на рис. 6.27.

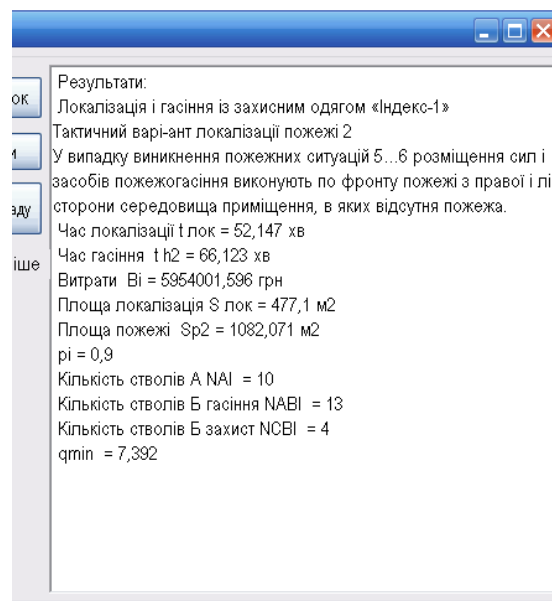


Рис. 6.27. Результат розрахунку і вибору тактичного варіанта локалізації і гасіння пожежі в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2»

Для ліквідації пожежі в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2» необхідно 10 пожежно-рятувальних відділень при використанні 10 стволів А і 17 стволів Б для гасіння та захисту. Цю умову пожежно-рятувальний підрозділ виконав. Але тривалість локалізації зайняла значно більше часу – до 8 год 40 хв замість 52,15 хв. Це можна пояснити так. Повідомлення про пожежу було передано після того, коли пожежею була охоплена площа об'єкта близько 1000 м². Такі обставини виникли у зв'язку з відсутністю на об'єкті системи протипожежного захисту. Після закінчення

локалізації ліквідація пожежі тривала 72 хв. Згідно з розрахунковими даними тривалість ліквідації пожежі повинна бути в межах 66,12 хв.

Наведені результати підтверджують обґрунтованість та адекватність розробленої системи оптимізації тактики локалізації і гасіння пожежі на деревообробних підприємствах. За наявності в деревообробному цеху на території ЗАТ «Будіндустрія 2» протипожежних засобів втрати від пожежі не перевищили б 595 4001,57 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. О 12 год 06 хв пожежу ліквідували. Фрагмент ліквідації пожежі зображено на рис. 6.28.



Рис. 6.28. Фрагмент ліквідації пожежі на складі готової продукції ТзОВ «Галфанера»

Результати розрахунку дали змогу 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 становить 6,4%, що є допустимим для реалізації розроблених програм.

Висновки

1. Розроблені математичні моделі оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж у цехах деревообробних підприємств і на відкритих складах лісоматеріалів дають підстави для впровадження в пожежно-рятувальну практику ДСНС обґрунтованих систем визначення в конкретних 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 як 20° .

3. Розроблені математичні моделі оптимізації тактики локалізації і гасіння пожеж у 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 змогу 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 аналізували на прикладах реальних пожеж на деревообробних підприємствах. Результати аналізу засвідчили, що такі системи цілком виправдано можна використовувати для ліквідації пожеж, тож рекомендуємо впроваджувати їх у практику пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України.

РОЗДІЛ 7

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТАКТИЧНИХ МЕТОДІВ ПО ЛОКАЛІЗАЦІЇ І ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

7.1 Характеристика об'єкта дослідження

На деревообробних підприємствах найбільш пожежонебезпечними спорудами, як ми вже зазначали, є закриті цехи, в яких обробляють деревину, та відкриті склади пиломатеріалів і склади круглих лісоматеріалів штабельного зберігання. З аналізу пожеж на деревообробних підприємствах випливає, що 64% всіх пожеж трапляються на відкритих складах лісо- і пиломатеріалів. Тому експериментальні дослідження з тактики локалізації та гасіння пожеж найдоцільніше виконувати для визначення тривалості ліквідації пожежі на відкритих складах лісоматеріалів. Адже на цей час уже виконано чимало експериментальних досліджень з ліквідації пожеж у закритих приміщеннях промислових підприємств [41, 58, 154, 155, 211], результати яких використовують на практиці підрозділи ДСНС України. Крім цього, опубліковано багато праць з аналізу ліквідації пожеж у закритих виробничих будівлях [100–102, 141, 168, 181], які дають змогу ефективно виконувати технологію гасіння пожеж у закритих виробничих цехах деревообробних підприємств.

Щодо ліквідації пожеж на відкритих складах лісоматеріалів розглядається лише аналіз їх ліквідації [139–141, 181] та методики розрахунку сил і засобів, наприклад [42, 43, 200]. Тому проведення експериментальних досліджень з ліквідації пожеж на відкритих складах лісоматеріалів є проблемним і актуальним завданням.

Основними елементами відкритих складів є штабелі. Склади круглих лісоматеріалів формуються штабелями круглого лісу (рис.7.1), а склади пиломатеріалів – штабелями пиляної деревини (рис. 7.2).

Результати теоретичних досліджень показали, що швидкість поширення фронту пожежі на складі круглих лісоматеріалів приблизно у два рази менша, ніж на складі пиломатеріалів. Наш висновок підтверджується результатами експериментальних досліджень ВНДПО (Росія) [200].



Рис. 7.1. Склад круглих лісоматеріалів [153]



Рис. 7.2. Склад пиломатеріалів [216]

Відповідно до цих результатів можна зробити висновок, що локалізація та гасіння пожежі на складі пиломатеріалів будуть триваліші і складніші. Тому експериментальні дослідження виконуватимемо для більш глибокого обґрунтованого встановлення технології гасіння пожеж на складах пиломатеріалів.

Перед початком процесу ліквідації пожежі пожежно-рятувальні підрозділи повинні виконати оперативне розгортання сил і засобів для її ліквідації. Тривалість процесу оперативного розгортання сил і засобів для

ліквідації пожежі в закритих приміщеннях, і навіть в багатоповерхових, уже визначена, її значення наведено в технічній літературі [37, 41, 55, 92, 98, 154, 155, 166, 176].

Однак це питання практично не досліджували стосовно відкритих складів лісоматеріалів, де процес оперативного розгортання значно складніший і залежить від багатьох чинників: місця виникнення пожежі на кварталі складу, напрямку і швидкості вітру, наявності пожежних гідрантів та водоймищ для подачі вогнегасної речовини в зону пожежі, кількості пожежної техніки, площі пожежі за тривалістю її вільного розвитку тощо. У технічній літературі визначення тривалості процесу оперативного розгортання сил і засобів на відкритих складах лісоматеріалу розглянуто недостатньо. Частково ці питання описано в роботах [43, 139–141, 181, 200]. Тому експериментальні дослідження виконуватимемо для визначення тривалості часу оперативного розгортання на відкритих складах лісоматеріалів.

Для виконання наведеного комплексу експериментальних досліджень необхідно вибрати технічне устаткування, вимірювальні прилади, а також розробити методику планування та математичної обробки результатів експериментів.

7.2 Методика експериментальних досліджень

7.2.1 Устаткування та вимірювальні прилади

Для дослідження часових характеристик діяльності пожежно-рятувальних служб у процесі виникнення пожежі, а саме часу оперативного розгортання та тривалості ліквідації пожежі на відкритих складах лісоматеріалів, використовували таке пожежно-технічне устаткування, технічне спорядження та відповідні вимірювальні прилади:

1. Автоцистерни типу АЦ40(130)63Б ДСТУ 3286-95.

2. Ручні пожежні стволи типу А ДСТУ 2112-92.
3. Ручні пожежні стволи типу В ДСТУ 2112-92.
4. Пожежні рукави d77 довжиною скатки 20 м типу К ДСТУ 3810-98.
5. Розгалуження пожежне ДСТУ 2111-92.
6. Колонку пожежну h-0,5 для відкриття (закриття) підземних гідрантів ДСТУ 2801-94 (висота колонки Н 750 мм, маса 85 кг).
7. Секундомір годинникового типу С ОС пр-2Б-2-000 (на 60 хв).
8. Телефонні апарати типу ТАН-70-4, які використовували для забезпечення якісного зв'язку в пожежно-рятувальних відділеннях.
9. Інструмент для визначення розмірів – рулетка 50 м ГОСТ 427-75.

7.2.2 Планування та методика математичної обробки результатів експериментів

Планування експериментальних досліджень виконуємо згідно з рекомендаціями для планування експерименту в технологічних дослідженнях [13, 40, 180]. Відповідно до них найбільше поширення отримали повнофакторні експерименти, у яких фактори k варіюють на двох рівнях, тобто експерименти типу 2^k . Менш популярні експерименти типу 3^k , оскільки із зростанням кількості рівнів факторів різко зростає кількість дослідів. Тому для проведення експериментальних досліджень приймаємо експерименти типу 2^k . При виконанні повнофакторного експерименту кількість дослідів визначають за залежністю

$$N = 2^k. \quad (7.1)$$

При розробленні планів для різних значень k привертає увагу та

обставина, що введення кожного нового фактора приводить до подвоєння кількості дослідів в плані: при $k = 6$ кількість дослідів $N = 64$, при $k = 7 - N = 128$ і т. д. Реалізація таких планів стає важким і дорогим завданням, а також вимагає великих витрат часу. Ефективність повного факторного експерименту в цьому випадку помітно знижується. Тому ця обставина привела до ідеї виконання дробового факторного експерименту.

На позначення дробового факторного експерименту використовують запис виду 2^{k-p} , де p – кількість взаємодій в повному факторному експерименті типу 2^k , яка підлягає заміні новими (додатковими) факторами. Якщо $p = 1$, то експеримент типу 2^{k-1} називається півреплікою від повного факторного експерименту типу 2^k . При $p = 2$ маємо чвертьрепліку і т. д.

Виходячи з наведених положень для виконання експериментальних досліджень, приймаємо дробовий факторний експеримент [114]. Такий підхід пояснюється значною кількістю факторів, які впливають на аргумент при проведенні кожного із запланованих експериментальних досліджень.

Планування і методика математичної обробки результатів експериментів із встановлення залежності для визначення часу оперативного розгортання сил і засобів пожежогасіння. Фактори (основні), які впливають на тривалість оперативного розгортання сил і засобів пожежогасіння:

- кількість відділень N_v , яка бере участь у ліквідації пожежі;
- кількість пожежних машин (автоцистерн) N_{ac} , яку необхідно поставити на пожежні гідранти;
- кількість пожежних машин (автоцистерн) – кількість N_{acv} , яку необхідно поставити на пожежне водоймище;
- кількість скаток пожежних рукавів N_p ;
- кількість ручних пожежних стволів типу А N_A ;
- кількість ручних пожежних стволів типу В N_B .

Оперативне розгортання пожежної техніки й обладнання можна виконувати з використанням двох основних схем (рис. 7.3).

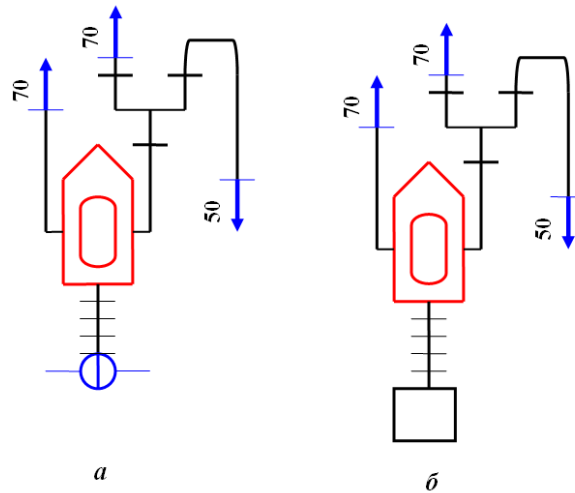


Рис. 7.3. Схеми оперативного розгортання пожежної техніки й обладнання: *а* – з використанням гідранта; *б* – з використанням пожежного водоймища

Враховуючи, що при такій кількості факторів емпірична залежність буде не лінійною, то її результат доцільно представити у вигляді [160]

$$\tau_{роз} = C_{\tau} N_{\tau}^{k_1} N_{\tau}^{k_2} N_{\tau}^{k_3} N_{\tau}^{k_4} N_{\tau}^{k_5} N_{\tau}^{k_6}, \text{ хв} \quad (7.2)$$

де C_{τ} – коефіцієнт пропорційності, який одночасно переводить всі одиниці розмірів у хв; $k_1, k_2, \dots, k_6$ – показники степеня для кожного зі шести факторів.

Для проведення цього комплексу експериментів з оперативного розгортання загальну кількість дослідів можна визначити так:

$$N_{роз} = 2^{6-3} = 8. \quad (7.3)$$

Для впевненості і гарної відтворюваності отриманих результатів дослідів їх необхідно повторити двічі, тобто кількість повторень $r = 2$.

Планування та методика математичної обробки результатів експериментів із встановлення залежності для визначення часу локалізації і гасіння пожежі на відкритому складі пиломатеріалів. Фактори (основні), які впливають на тривалість локалізації і гасіння пожежі:

– площа пожежі $S_{п}$, м²;

- площа локалізації пожежі $S_{\text{лок}}$, м^2 ;
- кількість ручних пожежних стволів типу А N_A ;
- кількість ручних пожежних стволів типу В N_B .

Під час проведення експериментальних досліджень необхідно враховувати наявність теплового випромінювання від осередку пожежі [200].

Густина теплового потоку в зоні встановлення пожежного автомобіля не повинна перевищувати $4,2 \text{ кВт/м}^2$, при цьому особовий склад може працювати у звичайному бойовому одязі і в касках із захисними щитками, а на пожежний автомобіль не виявляється помітного негативного впливу, крім систем живлення й охолодження двигуна. —

При подальшому збільшенні густини теплового потоку елементи конструкції ведуть себе так:

- 7 кВт/м^2 (нестерпні больові відчуття людини) — помітного впливу на конструкцію немає;
- $8,5\text{--}9 \text{ кВт/м}^2$ (опіки шкіри людини через 20 с) — розкладання, спучування фарби на кузові, початок обвуглювання гумотехнічних виробів, початок розкладання дерев'яних елементів;
- $10,5\text{--}13,5 \text{ кВт/м}^2$ (миттєві опіки) — обгорання забарвлення через 2 хв, інтенсивне обвуглювання гумотехнічних виробів через 4 хв, дерев'яних — через 5 хв;
- $14\text{--}15 \text{ кВт/м}^2$ (всередині захисного ковпака створюється непридатне для дихання середовище) — обгорання фарби через 1 хв, загорання гумотехнічних виробів через 1 хв, дерев'яних — через 5 хв.

Теплостійкість поверхні кузова пожежного автомобіля (гранична температура, при якій не відбувається порушення поверхневого шару: спучування фарби, розтріскування скління, деформація елементів) характеризується такими показниками:

Лакофарбові покриття	150–200 °С
Засклення кабіни (загартоване скло)	190 °С
Пластмасові елементи (склопластики на основі	

епоксидних смол) 200 °С

Якщо з тактичних міркувань необхідно встановити пожежний автомобіль на відстані від фронту полум'я, при якому можливе перевищення граничних температур, передбачають зрошення цього автомобіля за рахунок подачі води від автомобіля, установленого на безпечній відстані від нього. Для захисту коліс автомобілів, які можуть викотитися для гасіння розлитого палаючого палива, передбачають підбамперні вогнегасні й охолоджувальні насадки.

Значення густини теплового потоку q визначаємо за залежністю [112]

$$q = \frac{90\sqrt[3]{S_{II}}}{\sqrt{l_q^3}} \cdot \text{кВт/м}^2 \quad (7.4)$$

де l_q – відстань пожежника зі стволом від фронту пожежі, м ($l_q = L - h_{\text{лок}}$; L – встановлена довжина суцільного струменя вогнегасної речовини, м); $h_{\text{лок}}$ – глибина подачі вогнегасної речовини в осередок пожежі при її локалізації ($h_{\text{лок}} = 5$ м для ручних стволів [92]).

Для проведення експерименту скористаємося результатами роботи [106], в якій вказується, що найбільша швидкість розповсюдження пожежі при її виникненні в центральній частині кварталу складу пиломатеріалів. Тож розглянемо план розміщення штабелів у центральній частині кварталу (рис. 7.4).

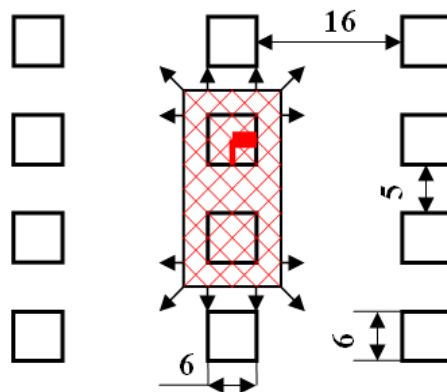


Рис. 7.4. План розміщення штабелів і осередку пожежі в центральній частині кварталу складу пиломатеріалів

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

Виконання експериментальних досліджень з використанням дійсних штабелів пиломатеріалів та з урахуванням повторення кожного дослідження економічно недоцільно. Тому, враховуючи рекомендації [84], для проведення експериментальних досліджень для визначення часу локалізації і гасіння пожежі на відкритому складі пиломатеріалів використовуватимемо модель штабеля з масштабуванням його розмірів. Найдоцільніше в цьому випадку використати масштаб 1:3 [115]. Для визначення дійсного часу локалізації і гасіння пожежі необхідно отримані результати збільшити утричі. Модель одного штабеля з масштабуванням його розмірів у вигляді модельного вогнища зображено на рис. 7.5.

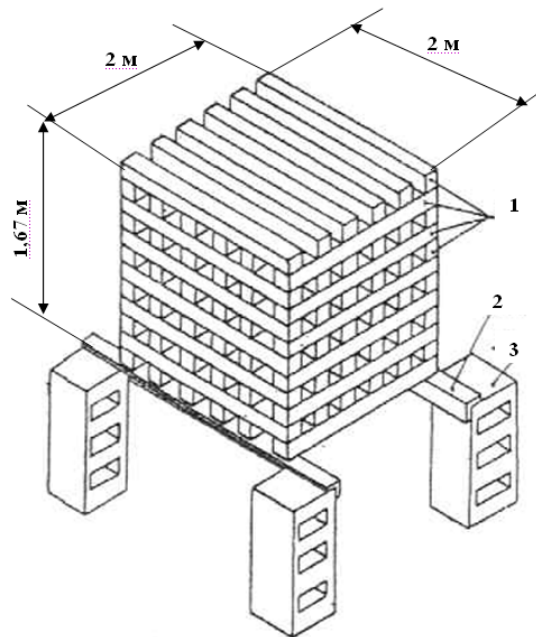


Рис. 7.5. Модель дерев'яного штабеля (модельного вогнища) для проведення експерименту з гасіння пожежі класу А: 1 – дерев'яні бруски; 2 – сталевий кутник; 3 – бетонний (металевий) блок

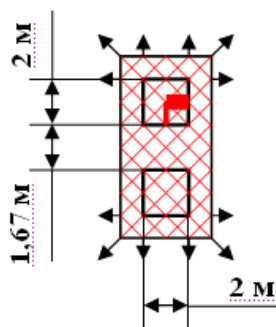


Рис. 7.6. Схема розміщення моделей штабелів для проведення експерименту з локалізації і гасіння пожежі

На першому етапі визначимо для модельних штабелів площу пожежі і площу локалізації. Площа пожежі S_{Π} – це площа, яка відповідає проекції зони горіння на горизонтальну площину. До площі пожежі входить також площа розривів між штабелями у тому випадку, коли ці розриви не перешкоджають горінню для конкретного виду пожежного навантаження. У нашому випадку $S_{\Pi} = k(2 + 1,67 + 2)^2 = 1,2 \cdot 5,67 \cdot 2 = 13,6 \text{ м}^2$, де k – коефіцієнт, який враховує збільшення площі пожежі за рахунок відходу полум'я за об'єкт горіння.

Під площею локалізації $S_{\text{лок}}$ розуміють площу поверхонь штабелів, на яку подають вогнегасну речовину. Площу локалізації можна визначити за залежністю

$$S_{\text{лок}} = l_{\phi}(h + h_{\text{лок}}), \quad (7.5)$$

де l_{ϕ} – довжина (периметр) фронту пожежі, м;

h – висота штабеля, м;

$h_{\text{лок}}$ – глибина подачі вогнегасної речовини, м.

Визначаємо для моделей штабелів $S_{\text{лок}}$ за залежністю (7.5) і рис. 7.6

$$S_{\text{лок}} = [2(2 + 1,67 + 2) + 2 \cdot 2](1,67 + 2) = 56,3 \text{ м}^2.$$

У зв'язку з тим, що $S_{\text{лок}} > S_{\Pi}$, то під час експериментальних досліджень для визначення тривалості гасіння приймаємо площу локалізації $S_{\text{лок}}$.

Для проведення цього комплексу досліджень з визначення часу локалізації і гасіння пожежі на модельних штабелях використовуємо дробовий факторний експеримент (чвертьрепліку) типу 2^{3-1} з кількістю дослідів $N_{\text{зас}} = 4$. Враховуючи, що емпірична залежність не буде лінійною, її результат доцільно представити у вигляді [180]

$$\tau_{\text{лок}} = C_{\tau_{\text{лок}}} S_{\text{лок}}^{\alpha} N_A^{\beta} N_B^{\gamma}, \text{ хв}; \quad (7.6)$$

$$\tau_z = \tau_{\text{лок}} \frac{S_{\Pi}}{S_{\text{лок}}}, \text{ хв} \quad (7.7)$$

де $C_{\tau_{\text{лок}}}$ – коефіцієнт пропорційності, який одночасно переводить всі одиниці розмірів у хв; α, β, γ – показники степеня для кожного з трьох факторів.

Модельні штабелі для отримання пожежі класу А виглядають як куб, який розміщується на металеву основу висотою 400 мм (рис. 7.5). Горючим матеріалом є бруски хвойних порід перерізом 39 мм з вологістю деревини 10...14%.

Під модельні штабелі підкладають піддони і наливають в них шар води товщиною 30 мм, а на цей шар наливають бензин А-76 приблизно 8,5-9 л. Далі підпалюють бензин в піддоні і після його вигорання піддон забирають з-під штабеля. Тривалість вільного горіння модельного штабеля приблизно 7-8 хв без врахування тривалості вигорання бензину з піддону. Після цього починають гасити штабелі.

Для визначення відстані пожежного ствола від осередку пожежі скористаємося залежністю (7.4). У цьому випадку приймаємо, що $S_{\Pi} = 0,5 S_{\text{лок}}$, а $q = 4 \text{ кВт/м}^2$

$$l_q = \left(\sqrt{\frac{90^3 \sqrt{28,15}}{4}} \right)^{0,33} = 2 \text{ м.}$$

Виходячи з результатів розрахунку, під час гасіння модельних штабелів пиломатеріалів стволи розміщуємо на безпечній відстані, тобто на відстані 15 м для рівномірного потрапляння вогнегасної речовини на осередок експериментальної пожежі. Приймаємо інтенсивність подання вогнегасної речовини $I_n^F = 0,2 \text{ л/м}^2\text{с}$ [92].

7.2.3 Методика експериментальних досліджень по оперативному розгортанню та тривалості локалізації і гасінню пожеж на деревообробних підприємствах пожежно-рятувальними підрозділами

Методика експериментальних досліджень по оперативному розгортанню сил і засобів пожежогасіння на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств.

Кодування факторів необхідне для перекладу натуральних факторів у безрозмірні величини, щоб мати нагоду побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту. Для перекладу натуральних змінних у кодові заповнюють таблицю змінних на двох рівнях. Як нульовий рівень факторів звичайно вибирають центр інтервалу. У промислових умовах нульовий рівень відповідає значенням факторів при існуючому процесі. Результати кодування факторів, які досліджуємо, наведено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Рівні зміни факторів

Рівні факторів	N_6		$N_{aцг}$		$N_{aцв}$		N_p		N_A		N_B	
	$\tilde{x}_1$	$\ln \tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\ln \tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	$\ln \tilde{x}_3$	$\tilde{x}_4$	$\ln \tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$	$\ln \tilde{x}_5$	$\tilde{x}_6$	$\ln \tilde{x}_6$
Верхній(+)	5	1,609	3	1,099	2	0,693	60	4,094	10	2,302	5	1,609
Нульовий(0)	4	—	2	—	1	—	40	—	6	—	4	—
Нижній(-)	3	1,099	1	0	1	0	20	2,996	2	0,693	3	1,099

Перетворюємо незалежні змінні $\tilde{x}_i$ на безрозмірні змінні за залежністю

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i\max})}{\ln \tilde{x}_{i\max} - \ln \tilde{x}_{i\min}} + 1. \quad (7.8)$$

$$x_1 = \frac{2(\ln N_{\epsilon} - 1,609)}{1,609 - 1,099} + 1 = 3,92 \ln N_{\epsilon} - 5,3;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln N_{ay,\epsilon} - 1,099)}{1,099 - 0} + 1 = 1,82 \ln N_{ay,\epsilon} - 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln N_{ay,\epsilon} - 0,693)}{0,693 - 0} + 1 = 2,89 \ln N_{ay,\epsilon} - 1;$$

$$x_4 = \frac{2(\ln N_p - 4,094)}{4,094 - 2,996} + 1 = 1,82 \ln N_p - 6,41;$$

$$x_5 = \frac{2(\ln N_A - 2,302)}{2,302 - 0,693} + 1 = 1,24 \ln N_A - 1,86;$$

$$x_6 = \frac{2(\ln N_B - 1,609)}{1,609 - 1,099} + 1 = 3,92 \ln N_B - 5,3.$$

Складання план-матриці експерименту. Складаємо план-матрицю дробового факторного експерименту типу 2^{6-3} (табл. 7.2). Рівняння із введенням членів, які враховують взаємодію факторів, записуємо в кодових змінних

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6. \quad (7.9)$$

Рандомізація дослідів. Встановлюємо випадковий порядок постановки дослідів у часі. У цьому випадку отримали таку послідовність проведення дослідів: 2, 4, 1, 4, 8, 6, 8, 5, 3, 5, 1, 3, 7, 2, 7, 6. У цій послідовності кожне поєднання рівнів (номери дослідів) зустрічається двічі. Паралельні досліді передбачаються для оцінки відтворюваності процесу і проведення статистичних оцінок.

Методика експериментальних досліджень по тривалості локалізації і гасінню пожеж на відкритих складах лісоматеріалів деревообробних підприємств.

Таблиця 7.2

План-матриця дробового факторного експерименту типу 2^{6-3}

№ досліду	x_1	x_2	x_3	$x_4 = x_1x_2$	$x_5 = x_1x_3$	$x_6 = x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+
2	–	+	+	–	–	+
3	+	–	+	–	+	–
4	–	–	+	+	–	–
5	+	+	–	+	–	–
6	–	+	–	–	+	–
7	+	–	–	–	–	+
8	–	–	–	+	+	+

Кодування факторів. Для перекладу натуральних змінних в кодові заповнюємо таблицю змінних на двох рівнях. Як нульовий рівень факторів вибираємо центр інтервалу. Результати кодування прийнятих факторів, а саме: площі локалізації пожежі $S_{лок}$, м²; кількості ручних пожежних стволів типу А N_A , одиниць; кількості ручних пожежних стволів типу В N_B , одиниць, наведено в табл. 7.3.

Таблиця 7.3

Рівні зміни факторів

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

Перетворюємо незалежні змінні $\tilde{x}_i$ на безрозмірні змінні за залежністю

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i\max})}{\ln \tilde{x}_{i\max} - \ln \tilde{x}_{i\min}} + 1. \quad (7.10)$$

$$x_1 = \frac{2(\ln S_{\text{лок}} - 4,03)}{4,03 - 3,34} + 1 = 2,9 \ln S_{\text{лок}} - 10,68;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln N_A - 0,693)}{0,693 - 0} + 1 = 2,89 \ln N_A - 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln N_B - 0,693)}{0,693 - 0} + 1 = 2,89 \ln N_B - 1.$$

Складання план-матриці експерименту. Складаємо план-матрицю дробового факторного експерименту типу 2^{3-1} (табл. 7.4). Рівняння із введенням членів, які враховують взаємодію факторів, записуємо в кодових змінних

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3. \quad (7.11)$$

Таблиця 7.4

План-матриця дробового факторного експерименту типу 2^{3-1}

№ досліду	x_1	x_2	$x_3 = x_1 x_2$
1	+	+	+
2	–	+	–
3	+	–	–
4	–	–	+

7.3 Результати експериментальних досліджень по оперативному розгортанню та тривалості локалізації і гасінню пожеж на деревообробних підприємствах пожежно-рятувальними підрозділами

7.3.1 Реалізація плану експерименту по оперативному розгортанню

Для гарної відтворюваності результатів дослідів приймаємо кількість повторних дослідів $r = 2$. У процесі виконання дослідів використовуємо

план-матрицю дробового факторного експерименту типу 2^{6-3} (табл. 7.2), а отримані результати заносимо в табл. 7.5 (додаток Б).

Визначення коефіцієнтів моделі. Коефіцієнти регресії за залежністю (7.8) визначаємо за залежностями

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{2,05 + 2,12 + 1,67 + 1,59 + 1,90 + 2,12 + 1,46 + 1,55}{8} = 1,8; \quad (7.12)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{1i}) \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{2,05(+1) + 2,12(-1) + 1,67(+1) + 1,59(-1) + 1,90(+1) + 2,12(-1) + 1,46(+1) + 1,55(-1)}{8} = -0,037; \quad (7.13)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{2i}) \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{2,05(+1) + 2,12(+1) + 1,67(-1) + 1,59(-1) + 1,90(+1) + 2,12(+1) + 1,46(-1) + 1,55(-1)}{8} = 0,24; \quad (7.14)$$

Таблиця 7.5

Умови та результати дослідів дробового факторного експерименту типу 2^{6-3}

№	N_v		$N_{a\alpha z}$		$N_{a\alpha v}$		N_p		N_A		N_B		Перший дослід y_{1i}	Другий дослід y_{2i}	Середнє значення $\bar{y}_i$	$\ln \bar{y}_i$
	x_1	Значення	x_2	Значення	x_3	Значення	x_4	Значення	x_5	Значення	x_6	Значення				
1	+	5	+	3	+	2	+	60	+	10	+	5	7,6	8,0	7,8	2,05
2	-	3	+	3	+	2	-	20	-	2	+	5	8,5	8,1	8,3	2,12
3	+	5	-	1	+	2	-	20	+	10	-	3	5,0	5,6	5,3	1,67
4	-	3	-	1	+	2	+	60	-	2	-	3	4,8	5,0	4,9	1,59
5	+	5	+	3	-	1	+	60	-	2	-	3	6,8	6,6	6,7	1,90
6	-	3	+	3	-	1	-	20	+	10	-	3	8,4	8,2	8,3	2,12
7	+	5	-	1	-	1	-	20	-	2	+	5	4,2	4,4	4,3	1,46
8	-	3	-	1	-	1	+	60	+	10	+	5	4,6	4,8	4,7	1,55

$$b_3 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{3i}) \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{2,05(+1)+2,12(+1)+1,67(+1)+1,59(+1)+1,90(-1)+2,12(-1)+1,46(-1)+1,55(-1)}{8} = 0,05;$$

(7.15)

$$b_4 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{4i}) \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{2,05(+1)+2,12(-1)+1,67(-1)+1,59(+1)+1,90(+1)+2,12(-1)+1,46(-1)+1,55(+1)}{8} = -0,035;$$

(7.16)

$$b_5 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{5i}) \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{2,05(+1)+2,12(-1)+1,67(+1)+1,59(-1)+1,90(-1)+2,12(+1)+1,46(-1)+1,55(+1)}{8} = 0,04;$$

(7.17)

$$b_6 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{6i}) \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{2,05(+1)+2,12(+1)+1,67(-1)+1,59(-1)+1,90(-1)+2,12(-1)+1,46(+1)+1,55(+1)}{8} = -0,013;$$

(7.18)

Перевірка відтворюваності дослідів. За однакової кількості паралельних дослідів на кожному поєднанні рівнів факторів відтворюваність процесу перевіряється за критерієм Кохрена

$$G = \frac{S_{pi\max}^2}{S_p^2} \leq G_{(0,05; f_n; f_r)}, \quad (7.19)$$

де $S_{pi\max}^2$ – найбільше значення з дисперсій розсіювання S_{pi}^2 (береться з третього стовпця табл. 7.6); S_p^2 – сума дисперсій розсіювання значень результатів експерименту; $f_n = N$ – кількість незалежних дослідів; $N = 8$ – кількість дослідів для нашого випадку; $f_r = r - 1 = 2 - 1 = 1$ – число ступенів вільності кожної оцінки; $G_{(0,05; f_n; f_r)}$ – табличне критичне значення критерію Кохрена [180]; $G_{(0,05; f_n; f_r)} = 0,6798$.

Визначаємо дисперсію відтворюваності. Для цього скористаємося допоміжною табл. 7.6, у якій спочатку визначаємо розсіювання дослідів відносно середнього значення

$$S_{pi} = \ln y_{i(1,2)} - \ln \bar{y}_i,$$

а потім дисперсію розсіювання кожного дослідів S_{pi}^2 , на підставі яких визначаємо дисперсію результатів всіх експериментів за залежністю

$$S_p^2 = \sum_{i=1}^{16} S_{pi}^2.$$

Визначаємо критерій Кохрена за залежністю (7.19) з урахуванням результатів табл. 7.6.

Таблиця 7.6

Визначення дисперсії розсіювання значень результатів експерименту S_p^2

№	$S_{pi} = \ln y_{i(1,2)} - \ln \bar{y}_i$	S_{pi}^2
1	$S_{p1} = \ln y_{1(1)} - \ln \bar{y}_1$	0,0004
2	$S_{p2} = \ln y_{1(2)} - \ln \bar{y}_1$	0,0009
3	$S_{p3} = \ln y_{2(1)} - \ln \bar{y}_2$	0,0004
4	$S_{p4} = \ln y_{2(2)} - \ln \bar{y}_2$	0,0009
5	$S_{p5} = \ln y_{3(1)} - \ln \bar{y}_3$	0,0036
6	$S_{p6} = \ln y_{3(2)} - \ln \bar{y}_3$	0,0025
7	$S_{p7} = \ln y_{4(1)} - \ln \bar{y}_4$	0,0004
8	$S_{p8} = \ln y_{4(2)} - \ln \bar{y}_4$	0,00036
9	$S_{p9} = \ln y_{5(1)} - \ln \bar{y}_5$	0,0003
10	$S_{p10} = \ln y_{5(2)} - \ln \bar{y}_5$	0,0002
11	$S_{p11} = \ln y_{6(1)} - \ln \bar{y}_6$	0,00006
12	$S_{p12} = \ln y_{6(2)} - \ln \bar{y}_6$	0,0003
13	$S_{p13} = \ln y_{7(1)} - \ln \bar{y}_7$	0,0006
14	$S_{p14} = \ln y_{7(2)} - \ln \bar{y}_7$	0,0004

15	$S_{p15} = \ln y_{8(1)} - \ln \bar{y}_8$	0,0006
16	$S_{p16} = \ln y_{8(2)} - \ln \bar{y}_8$	0,0004
$S_p^2 = \sum_{i=1}^{16} S_{pi}^2$		0,01232

$$G = \frac{0,0036}{0,01232} = 0,3045 < G_{(0,05; f_n; f_r)} = 0,6798,$$

тобто відтворюваність процесу забезпечується.

Значущість коефіцієнтів регресії оцінюємо за допомогою критерію Стюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується нерівність з урахуванням половини довжини довірчого інтервалу [180]

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05; f)} S(b_i), \quad (7.20)$$

де $t_{(0,05; f)}$ – критичне значення критерію Стюдента для $f = N(r - 1)$ (у нашому випадку $f = 8(2 - 1) = 8$) і $\alpha = 0,05$; $t_{(0,05; f)} = 2,31$;

$$S(b_i) = \pm \sqrt{\frac{S_p^2}{N^2(r-1)r}}. \quad (7.21)$$

Тоді

$$S(b_i) = \pm \sqrt{\frac{0,01232}{8^2(2-1)2}} = \pm 0,0098; \quad \Delta b_i = 2,31 \cdot 0,0098 = 0,0226.$$

Результати оцінки значущості коефіцієнтів регресії показали, що всі коефіцієнти крім b_6 є значущими. Але не враховувати коефіцієнт b_6 не можна, тому що він необхідний для встановлення впливу стволів N_B на тривалість оперативного розгортання. У цьому випадку залишених членів апроксимуючого полінома буде $m = 7$, а математична модель набуває виду

$$y = 1,8 - 0,037x_1 + 0,24x_2 + 0,05x_3 - 0,035x_4 + 0,04x_5 - 0,013x_6. \quad (7.22)$$

Адекватність моделі перевіряють за допомогою критерію Фішера. Адекватність обґрунтована, якщо виконується нерівність [180]

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{\epsilon}^2} \leq F_{(0,05; f_1; f_2)}, \quad (7.23)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності; S_{ϵ}^2 – дисперсія відтворюваності (похибка досліду);

$$S_{ad}^2 = \frac{r}{N-m} \sum_{i=1}^N (\ln \bar{y}_i - y_i)^2; \quad (7.24)$$

$$S_{\epsilon}^2 = \frac{S_p^2}{N(r-1)}; \quad (7.25)$$

y_i – розрахункове значення параметра за залежністю (7.22) після підстановки значень (+1) і (–1) у відповідності з матрицею планування дослідів (табл. 7.5). У нашому випадку отримаємо $y_1, y_2, \dots, y_8$, з використанням з табл. 7.5 для розрахунків значень $\ln \bar{y}_1, \ln \bar{y}_2, \dots, \ln \bar{y}_8$; $F_{(0,05; f_1; f_2)}$ – табличне критичне значення критерію Фішера при $\alpha = 0,05$; $f_1 = N - m = 8 - 7 = 1$; $f_2 = N(r - 1) = 8(2-1) = 8$; $F_{(0,05; f_1; f_2)} = 5,3177$ [180].

Визначаємо $y_1, y_2, \dots, y_8$ за залежністю (7.22)

$$y = 1,8 - 0,037(+1) + 0,24(+1) + 0,05(+1) - 0,035(+1) + 0,04(+1) - 0,013(+1) = 2,045;$$

$$y = 1,8 - 0,037(-1) + 0,24(+1) + 0,05(+1) - 0,035(-1) + 0,04(-1) - 0,013(+1) = 2,109;$$

$$y = 1,8 - 0,037(+1) + 0,24(-1) + 0,05(+1) - 0,035(-1) + 0,04(+1) - 0,013(-1) = 1,661;$$

$$y = 1,8 - 0,037(-1) + 0,24(-1) + 0,05(+1) - 0,035(+1) + 0,04(-1) - 0,013(-1) = 1,585;$$

$$\begin{aligned}
y &= 1,8 - 0,037(+1) + 0,24(+1) + 0,05(-1) - 0,035(+1) + 0,04(-1) - 0,013(-1) = 1,891; \\
y &= 1,8 - 0,037(-1) + 0,24(+1) + 0,05(-1) - 0,035(-1) + 0,04(+1) - 0,013(-1) = 2,115; \\
y &= 1,8 - 0,037(+1) + 0,24(-1) + 0,05(-1) - 0,035(-1) + 0,04(-1) - 0,013(+1) = 1,695; \\
y &= 1,8 - 0,037(-1) + 0,24(-1) + 0,05(-1) - 0,035(+1) + 0,04(+1) - 0,013(+1) = 1,539.
\end{aligned}$$

Визначаємо дисперсію адекватності і відтворюваності відповідно за залежностями (7.24) і (7.25)

$$\begin{aligned}
S_{ad}^2 &= \frac{2}{8-7} [(2,05 - 2,045)^2 + (2,12 - 2,109)^2 + (1,67 - 1,661)^2 + (1,59 - 1,585)^2 + \\
&+ (1,90 - 1,891)^2 + (2,12 - 2,115)^2 + (1,46 - 1,695)^2 + (1,55 - 1,539)^2] = 0,1114;
\end{aligned}$$

$$S_{\epsilon}^2 = \frac{0,01232}{8(2-1)} = 0,00154.$$

Згідно з рекомендаціями [180, 40] у випадку, коли S_{ϵ}^2 у кілька разів менша від S_{ad}^2 , то критерій Фішера визначають так:

$$F = \frac{0,00154}{0,1114} = 0,014 < F_{(0,05; f_1; f_2)} = 5,3177,$$

тобто модель (7.19) адекватна.

Представлення рівняння з кодованими факторами у вигляді з натуральними змінними. Для приведення рівняння (7.22) з кодованими факторами у вигляді з натуральними змінними використовуємо залежність (7.8). У цьому випадку отримуємо рівняння виду, в якому замість кодових позначень $x_1, x_2, \dots, x_6$ проставляємо зв'язок між кодовим і натуральним виразом за залежністю (7.8).

Усі цифрові значення спрощуються та скорочуються, що дозволяє отримати спочатку рівняння виду

$$y = 1,8 - 0,037(3,92 \ln N_{\epsilon} - 5,3) + 0,24(1,82 \ln N_{a\epsilon, z} - 1) + 0,05(2,89 \ln N_{a\epsilon, \epsilon} - 1) - \\ - 0,035(1,82 \ln N_p - 6,41) + 0,04(1,24 \ln N_A - 1,86) - 0,013(3,92 \ln N_B - 5,3),$$

а потім

$$\ln \tau_{роз} = e^{1,93} + \ln N_{\epsilon}^{-0,146} + \ln N_{a\epsilon, z}^{0,44} + \ln N_{a\epsilon, \epsilon}^{0,14} + \ln N_p^{-0,06} + \ln N_A^{0,05} + \ln N_B^{-0,05}.$$

Після потенціювання отримаємо модель для визначення часу оперативного розгортання залежно від кількості сил (відділень) та основних засобів пожежогасіння

$$\tau_{роз} = 6,89 N_{\epsilon}^{-0,146} N_{a\epsilon, z}^{0,44} N_{a\epsilon, \epsilon}^{0,14} N_p^{-0,06} N_A^{0,05} N_B^{-0,05}. \quad (7.26)$$

7.3.2 Реалізація плану експерименту по тривалості локалізації і гасінню пожежі на відкритому складі пиломатеріалів

Для гарної відтворюваності результатів дослідів приймаємо кількість повторних дослідів $r = 2$. У процесі виконання дослідів використовуємо план-матрицю дробового факторного експерименту типу 2^{3-1} (табл. 7.4), а отримані результати заносимо в табл. 7.7 (додаток В).

Таблиця 7.7

Умови та результати дослідів дробового факторного експерименту типу 2^{3-1}

№	S _{лок}		N _A		N _B		Пер- ший дослід y _{1i} , хв	Дру- гий дослід y _{2i} , хв	Середнє значення $\bar{y}_i$, хв	$\ln \bar{y}_i$
	x ₁	Зна- чення	x ₂	Зна- чення	x ₃	Зна- чення				
1	+	56,3	+	2	+	2	43,0	45,0	44,0	3,78
2	–	28,15	+	2	–	1	25,2	26,4	25,8	3,25
3	+	56,3	–	1	–	1	78,0	76,6	77,3	4,35
4	–	28,15	–	1	+	2	31,5	30,5	31,0	3,43

Визначення коефіцієнтів моделі. Коефіцієнти регресії для залежності (7.10) визначаємо за залежностями

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^4 \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{3,78 + 3,25 + 4,35 + 3,43}{4} = 3,7; \quad (7.27)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^4 (x_{1i}) \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{3,78(+1) + 3,25(-1) + 4,35(+1) + 3,43(-1)}{4} = 0,363; \quad (7.28)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^4 (x_{2i}) \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{3,78(+1) + 3,25(+1) + 4,35(-1) + 3,43(-1)}{4} = -0,19; \quad (7.29)$$

$$b_3 = \frac{\sum_{i=1}^4 (x_{3i}) \ln \bar{y}_i}{N} = \frac{3,78(+1) + 3,25(-1) + 4,35(-1) + 3,43(+1)}{4} = -0,1. \quad (7.30)$$

Перевірка відтворюваності дослідів. За однакової кількості паралельних дослідів на кожному поєднанні рівнів факторів відтворюваність процесу перевіряємо за критерієм Кохрена (7.19). Для цього визначаємо дисперсію розсіювання, використовуючи допоміжну табл. 7.8.

Таблиця 7.8

Визначення дисперсії розсіювання значень результатів експерименту S_p^2

№	$S_{pi} = \ln y_{i(1,2)} - \ln \bar{y}_i$	S_{pi}^2
1	$S_{p1} = \ln y_{1(1)} - \ln \bar{y}_1$	0,0004
2	$S_{p2} = \ln y_{1(2)} - \ln \bar{y}_1$	0,0004
3	$S_{p3} = \ln y_{2(1)} - \ln \bar{y}_2$	0,0001
4	$S_{p4} = \ln y_{2(2)} - \ln \bar{y}_2$	0,0004
5	$S_{p5} = \ln y_{3(1)} - \ln \bar{y}_3$	0,0009

6	$S_{p6} = \ln y_{3(2)} - \ln \overline{y_3}$	0,0009
7	$S_{p7} = \ln y_{4(1)} - \ln \overline{y_4}$	0,0001
8	$S_{p8} = \ln y_{4(2)} - \ln \overline{y_4}$	0,0001
$S_p^2 = \sum_{i=1}^8 S_{pi}^2$		0,0033

$$G = \frac{0,0009}{0,0033} = 0,2727 < G_{(0,05; f_n; f_r)} = 0,9065,$$

тобто відтворюваність процесу забезпечується.

Значущість коефіцієнтів регресії оцінюємо за допомогою критерію Стюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується нерівність з урахуванням половини довжини довірчого інтервалу (7.20).

Критичне значення критерію Стюдента $t_{(0,05; f)}$ для $f = N(r - 1)$ (у нашому випадку $f = 4(2 - 1) = 4$) і $\alpha = 0,05$; $t_{(0,05; f)} = 2,78$.

Тоді з урахуванням (7.21)

$$S(b_i) = \pm \sqrt{\frac{0,0033}{4^2(2-1)2}} = \pm 0,0102; \quad \Delta b_i = 2,78 \cdot 0,0102 = 0,028.$$

Результати оцінки значущості коефіцієнтів регресії показали, що всі коефіцієнти є значущими. У цьому випадку залишених членів апроксимуючого полінома буде $m = 4$ (без b_0 $m = 3$), а математична модель набуває виду

$$y = 3,7 + 0,363x_1 - 0,19x_2 - 0,1x_3. \quad (7.31)$$

Адекватність моделі перевіряємо за допомогою критерію Фішера. Визначаємо $y_1, y_2, \dots, y_4$ за залежністю (7.31):

$$y_1 = 3,7 + 0,363(+1) - 0,19(+1) - 0,1(+1) = 3,773;$$

$$y_2 = 3,7 + 0,363(-1) - 0,19(+1) - 0,1(-1) = 3,247;$$

$$y_3 = 3,7 + 0,363(+1) - 0,19(-1) - 0,1(-1) = 4,353;$$

$$y_4 = 3,7 + 0,363(-1) - 0,19(-1) - 0,1(+1) = 3,427.$$

Визначаємо дисперсію адекватності і відтворюваності відповідно за залежностями (7.24) і (7.25)

$$S_{ad}^2 = \frac{2}{4-3} [(3,78-3,773)^2 + (3,25-3,247)^2 + (4,35-4,353)^2 + (3,43-3,427)^2] = 0,000152;$$

$$S_e^2 = \frac{0,0033}{4(2-1)} = 0,000825.$$

Визначаємо значення критерію Фішера і порівнюємо з допустимим значенням

$$F = \frac{0,000152}{0,000825} = 0,1842 < F_{(0,05; f_1; f_2)} = 7,7086,$$

тобто модель (7.31) адекватна.

Представлення рівняння з кодованими факторами у вигляді з натуральними змінними. Для приведення рівняння (7.31) з кодованими факторами у вигляді з натуральними змінними використовуємо залежність (7.8). У цьому випадку отримуємо рівняння виду, в якому замість кодових позначень x_1, x_2, x_3 проставляємо зв'язок між кодовим і натуральним виразом за залежністю (7.8).

Усі цифрові значення спрощуються та скорочуються, що дозволяє отримати спочатку рівняння виду

$$y = 3,7 + 0,363(2,9 \ln S_{лок} - 10,68) - 0,19(2,89 \ln N_A - 1) - 0,1(2,89 \ln N_B - 1),$$

а потім

$$\ln \tau_{\text{лок}} = e^{-0,07} + \ln S_{\text{лок}}^{1,07} + \ln N_A^{-0,55} + \ln N_B^{-0,289}$$

Після потенціювання отримаємо модель для визначення часу локалізації пожежі при гасінні штабелів пиломатеріалів відкритого складу залежно від площі локалізації та кількості пожежних стволів А і В, які використовують при гасінні

$$\tau_{\text{лок}} = 0,93 S_{\text{лок}}^{1,07} N_A^{-0,55} N_B^{-0,289}, \text{ хв} \quad (7.32)$$

7.4 Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень

7.4.1 Аналіз результатів експериментальних досліджень по визначенню тривалості оперативного розгортання

На підставі отриманої моделі для визначення часу оперативного розгортання розглянемо і проаналізуємо вплив на цей час основних факторів цього процесу.

Вплив на $\tau_{\text{роз}}$ кількості відділень (всі інші фактори приймають значення різних рівнів) (рис. 7.7).

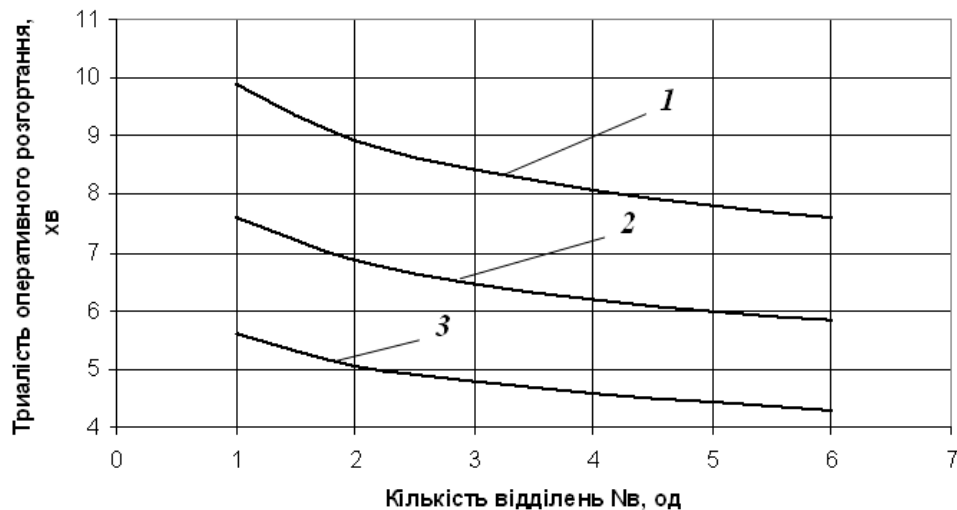


Рис. 7.7. Вплив кількості відділень на тривалість оперативного розгортання:
 1 – при верхньому рівні значень інших факторів (табл. 7.1);
 2 – при нульовому рівні значень інших факторів;
 3 – при нижньому рівні значень інших факторів

Результати аналізу впливу кількості відділень на тривалість оперативного розгортання показують (рис. 7.7), що зі збільшенням їх кількості від одного відділення до шести $\tau_{роз}$ зменшується в 1,3 разу. Крім цього, при зменшенні засобів пожежогасіння до мінімальних значень ($N_{ац\ з} = 1$; $N_{ац\ в} = 1$; $N_p = 20$ скаток (400 м рукавів); стволів $N_A = 2$; стволів $N_B = 3$) з використанням шести відділень у порівнянні з розгортанням максимальної кількості засобів пожежогасіння значення $\tau_{роз}$ зменшується у 2,3 разу. Тобто тривалість оперативного розгортання залежить передусім від кількості відділень, які залучаються до виконання цієї роботи.

Вплив на $\tau_{роз}$ кількості пожежних автомобілів $N_{ац\ з}$, які повинні бути встановлені на пожежні гідранти (всі інші фактори приймають значення нульового рівня згідно з даними табл. 7.1) (рис. 7.8).

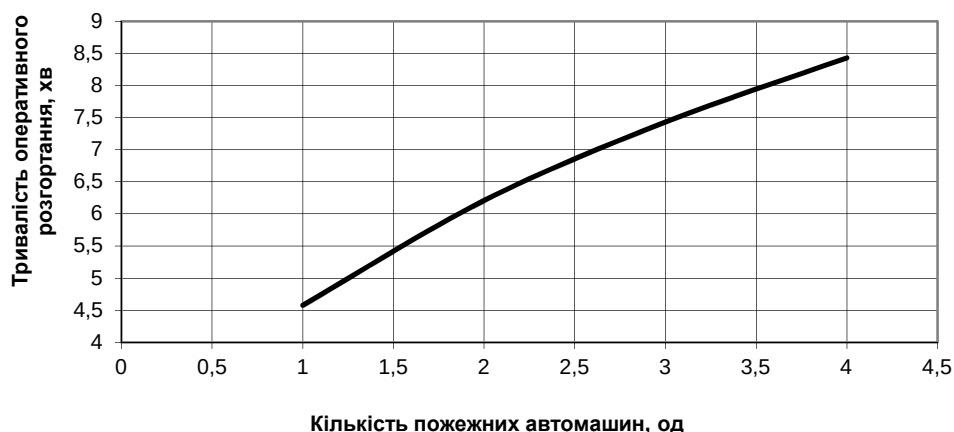


Рис. 7.8. Вплив кількості пожежних автомашин $N_{ацг}$ на тривалість оперативного розгортання

Аналіз впливу кількості пожежних автомашин $N_{ацг}$ на тривалість оперативного розгортання (рис. 7.8) показує, що при їх збільшенні $\tau_{роз}$ збільшується у разі використання сталої кількості відділень. Зі збільшенням, наприклад, кількості відділень з чотирьох до шести тривалість оперативного розгортання зменшується на 30%. Це також підтверджує висновок про те, що тривалість оперативного розгортання насамперед залежить від кількості відділень, які залучають до виконання цієї роботи.

Вплив на $\tau_{роз}$ кількості пожежних ручних стволів N_A , які залучають для ліквідації пожежі (всі інші фактори приймають значення нульового рівня згідно з даними табл. 7.1) (рис. 7.9).

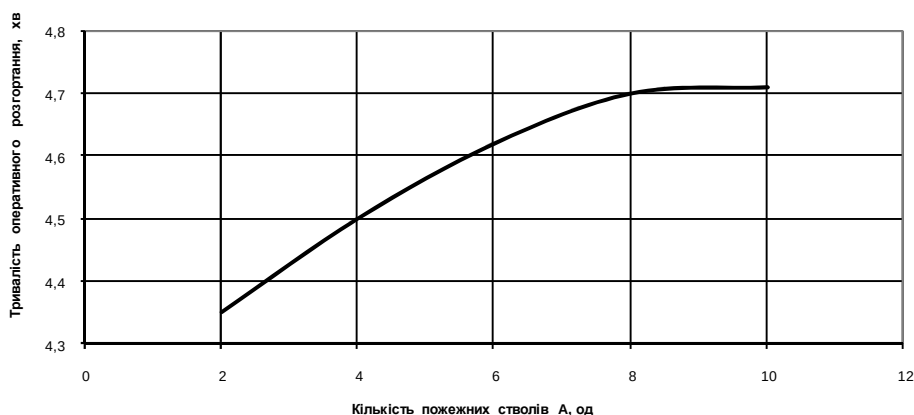


Рис. 7.9. Вплив кількості пожежних стволів N_A на тривалість оперативного розгортання

Результати аналізу (рис. 7.9) показують, що при незмінній кількості відділень та зі збільшенням кількості пожежних стволів N_A $\tau_{роз}$ збільшується.

На рис. 7.9 оперативне розгортання здійснюють чотири відділення. При їх збільшенні, наприклад, до п'яти $\tau_{роз}$ зменшується на 5%. З наведеного аналізу можна зробити висновок, що для зменшення тривалості оперативного розгортання насамперед необхідно залучати більше пожежно-рятувальних відділень.

7.4.2 Аналіз результатів експериментальних досліджень по визначенню тривалості локалізації і гасінню пожежі на відкритому складі пиломатеріалів

На підставі моделі (7.32) для визначення часу локалізації пожежі при гасінні штабелів пиломатеріалів відкритого складу залежно від площі локалізації та кількості пожежних стволів А і В, які використовують при гасінні, проаналізуємо отримані результати. При цьому скористаємося умовою проведення експериментальних досліджень, яка полягала у прийнятті масштабу для модельних штабелів 1:3. Тобто під час аналізу ми розглядатимемо розміри дійсного штабеля (рис. 7.4).

Штабелі розміром $b \times l \times h = 6 \times 6 \times 5$ м; ширина поздовжніх розривів між штабелями $b_{нов} = 16$ м; ширина поперечних розривів між штабелями $b_{поп} = 5$ м. У цьому випадку площа локалізації з двох сторін для двох штабелів дорівнюватиме при довжині фронту пожежі $l_{\phi} = (6 \cdot 3 + 5)2 = 46$ м

$$S_{лок} = l_{\phi} (h + h_{лок}) = 46(5 + 5) = 460 \text{ м}^2.$$

Крім цього, під час експериментальних досліджень для максимальної площі локалізації (табл. 7.7) використовували 2 стволи А і 2 стволи В. Враховуючи масштаб 1:3, приймаємо $N_A = 6$ та $N_B = 6$. Тоді

$$\tau_{лок} = 0,93 \cdot 460^{1,07} \cdot 6^{-0,55} \cdot 6^{-0,289} = 145,9, \text{ хв.}$$

Аналіз отриманого результату показує, що співвідношення тривалості $\tau_{лок}$ для локалізації пожежі на дійсних штабелях у порівнянні з модельними ($\bar{y}_1 = 44$ хв, табл. 7.7) згідно з прийнятим масштабом 1:3 дорівнюватиме

$$\frac{\tau_{лок}}{y} = \frac{145,9}{44} = 3,3 \text{ рази,}$$

що відповідає прийнятому масштабу з відносною похибкою до 10%, яка є допустимою під час експериментальних досліджень, за результатами яких отримана математична модель [180].

Для визначення тривалості гасіння пожежі τ_z скористаємося залежністю (7.7)

$$\tau_z = \tau_{лок} \frac{S_{\Pi}}{S_{лок}} = 145,9 \frac{102}{460} = 32,1 \text{ хв,}$$

де $S_{\Pi} = (2l + b_{non})b = (2 \cdot 6 + 5)6 = 102 \text{ м}^2$ – площа пожежі для двох штабелів (рис. 7.4).

Крім цього, визначаємо час на закінчення ліквідації пожежі (остаточне гасіння) [111] за залежністю

$$\tau_{лік} = 0,25(\tau_{лок} + \tau_z) = 0,25(145,9 + 32,1) = 44,5 \text{ хв.}$$

Тоді загальний прогнозований час ліквідації пожежі на двох штабелях пиломатеріалів буде

$$\tau_{лок} + \tau_z + \tau_{лік} = 145,9 + 32,1 + 44,5 = 222,5 \text{ хв.}$$

Розглянемо і проаналізуємо вплив на $\tau_{лок}$ основних факторів процесу локалізації і гасіння пожежі на відкритому складі пиломатеріалів.

Вплив на $\tau_{лок}$ площі локалізації $S_{лок}$. Під час розгляду й аналізу цього питання брали різну кількість ручних пожежних стволів типу А (рис. 7.10) ($1 - N_A = 3$; $2 - N_A = 6$; $3 - N_A = 9$). Кількість ручних пожежних стволів типу В була прийнята $N_B = 3$ і ця кількість залишалася сталою.

Результати аналізу показали, що при збільшенні площі локалізації тривалість локалізації збільшується. Наприклад, зі збільшенням площі локалізації у 5 разів тривалість локалізації збільшується у 5,6 разу. На тривалість локалізації значно впливає кількість ручних пожежних стволів типу А. Наприклад, при збільшенні кількості цього типу стволів у 2 рази $\tau_{лок}$ зменшується приблизно в 1,5 разу, а зі збільшенням у 3 рази $\tau_{лок}$ зменшується приблизно в 1,9 разу.

Для аналізу тривалості гасіння пожежі розглядали варіанти виникнення пожежі на складі пиломатеріалів, а саме: 1) пожежа на двох штабелях в одному поздовжньому ряду ($S_{лок} = 460 \text{ м}^2$, $S_{П} = 102 \text{ м}^2$, $S_{П}/S_{лок} = 0,22$); 2) пожежа на чотирьох штабелях в одному поздовжньому ряду ($S_{лок} = 900 \text{ м}^2$, $S_{П} = 234 \text{ м}^2$, $S_{П}/S_{лок} = 0,26$); 3) пожежа на чотирьох штабелях, які розміщені на двох сусідніх поздовжніх рядах ($S_{лок} = 800 \text{ м}^2$, $S_{П} = 476 \text{ м}^2$, $S_{П}/S_{лок} = 0,6$); 4) пожежа на восьми штабелях, які розміщені на двох сусідніх поздовжніх рядах ($S_{лок} = 1340 \text{ м}^2$, $S_{П} = 1092 \text{ м}^2$, $S_{П}/S_{лок} = 0,8$). Гасили пожежу ручними пожежними стволами типу А, яких було 9 штук. Результати наведеного аналізу зображено на рис. 7.11.

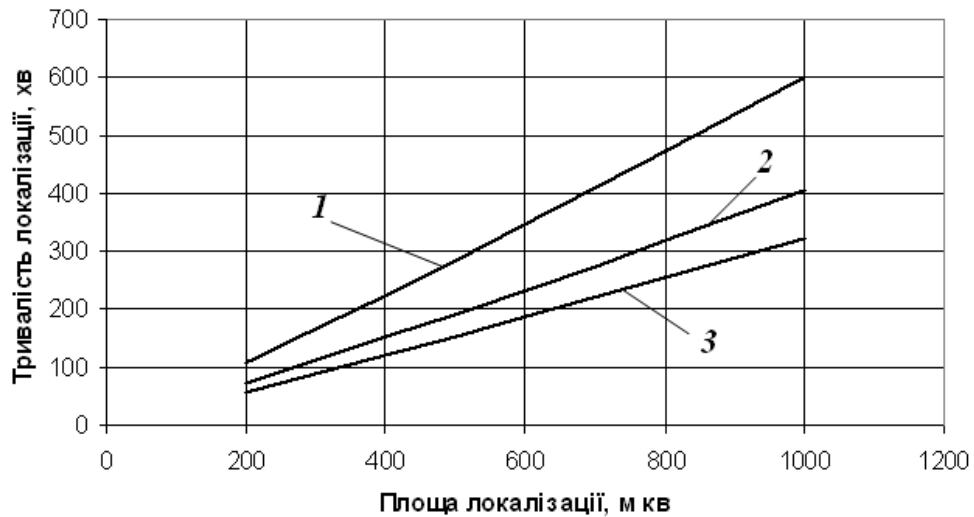


Рис. 7.10. Вплив площі локалізації пожежі на тривалість локалізації при використанні пожежних стволів: **1** – $N_A = 3$, $N_B = 3$; **2** – $N_A = 6$, $N_B = 3$; **3** – $N_A = 9$, $N_B = 3$

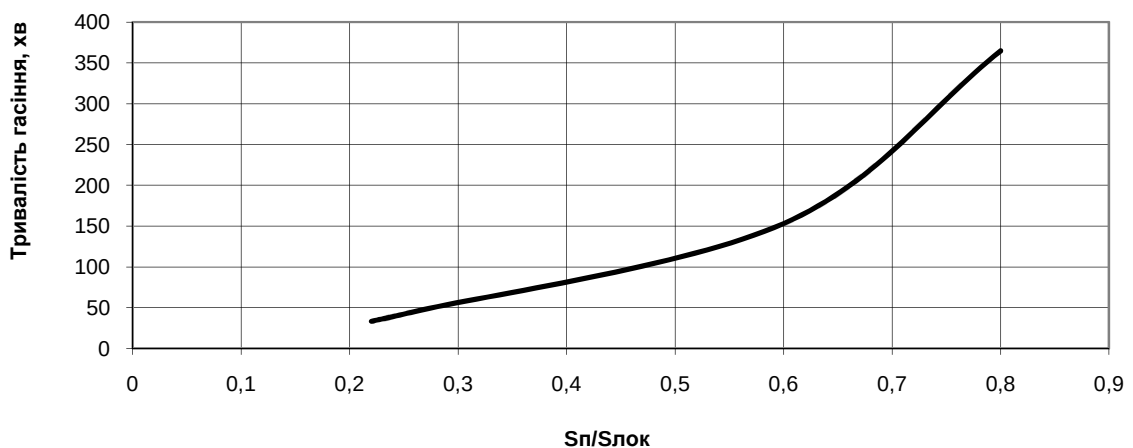


Рис. 7.11. Вплив співвідношення $\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}}$ на тривалість гасіння пожежі

З аналізу залежності $\tau_z = f\left(\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}}\right)$ (рис. 7.11) можна зробити висновок,

що при збільшенні співвідношення $\frac{S_{\Pi}}{S_{лок}}$ тривалість гасіння збільшується.

Наприклад, зі збільшенням цього співвідношення від 0,22 до 0,8, тобто у 3,6 разу, тривалість гасіння збільшується в 11 разів.

З наведеного аналізу можна зробити висновок, що для зменшення тривалості локалізації пожежі при її гасінні на штабелях пиломатеріалів на відкритих складах лісоматеріалів необхідно насамперед збільшувати кількість пожежних стволів для подачі вогнегасної речовини. Їх кількість доцільно встановлювати на підставі оптимізації процесу ліквідації пожежі. Більше впливають на зменшення часу локалізації пожежні стволи типу А. Це пояснюється тим, що стволи типу В застосовують переважно для захисту від поширення пожежі на сусідні штабелі і частково для гасіння.

Висновки

1. На підставі виконання дробового факторного експерименту та отриманих результатів розроблено адекватну математичну модель, яка дозволяє обґрунтовано визначати час оперативного розгортання підрозділів ДСНС при ліквідації пожежі на відкритих складах лісоматеріалів.

2. Результати аналізу математичної моделі для визначення часу оперативного розгортання показали, що для зменшення тривалості оперативного розгортання насамперед потрібно залучати більше пожежно-рятувальних відділень. Наприклад, зі збільшенням кількості відділень від одного до шести $\tau_{роз}$ зменшується в 1,3 разу.

3. Розроблено адекватну математичну модель з використанням дробового факторного експерименту для визначення часу локалізації пожежі при гасінні штабелів пиломатеріалів відкритого складу залежно від площі локалізації та кількості пожежних стволів А і В, які використовують для ліквідації пожежі.

4. Встановлено, що зі збільшенням площі локалізації тривалість локалізації збільшується. Наприклад, при збільшенні площі локалізації у 5 разів тривалість локалізації збільшується у 5,6 разу. На тривалість локалізації також впливає кількість ручних пожежних стволів типу А. Наприклад, зі збільшенням кількості стволів А у 2 рази $\tau_{лок}$ зменшується

приблизно у 1,5 разу, а зі збільшенням у 3 рази $\tau_{лок}$ зменшується приблизно в 1,9 разу.

5. На тривалість гасіння пожежі передусім впливає співвідношення площі пожежі і площі локалізації. Зі збільшенням цієї величини тривалість гасіння збільшується. Так, при збільшенні цього співвідношення у 3,6 разу час гасіння пожежі збільшується в 11 разів.

6. Для зменшення тривалості локалізації і гасіння пожежі необхідно насамперед збільшувати використання стволів типу А (для гасіння) і стволів типу В для гасіння і захисту. Їх кількість доцільно встановлювати на підставі оптимізації тривалості процесу ліквідації пожежі.

РОЗДІЛ 8

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

8.1 Методи прогнозування виникнення пожежі на деревообробних підприємствах

Прогнозування виникнення пожеж на об'єктах захисту є основою для вирішення питань, які пов'язані з організацією ліквідації пожеж на найважливіших пожежонебезпечних, вибухонебезпечних і складних в оперативно-тактичному сенсі 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 ймовірності її виникнення. Ймовірність виникнення пожежі на об'єкті визначають на таких етапах: 1) проектування об'єкта; 2) будівництво; 3) у процесі експлуатації об'єкта. На сучасному етапі проектування та будівництво нових деревообробних підприємств майже не здійснюється. Тому розглянемо методи прогнозування виникнення пожеж на деревообробних підприємствах, які діють зараз:

1. Ймовірність виникнення пожежі на деревообробному підприємстві визначають на підставі статистичних даних для розглядуваного приміщення. За відсутності статистичних даних, допускається згідно з рекомендаціями методики МНС РФ для визначення розрахункових величин пожежного ризику ймовірність виникнення пожежі рекомендовано приймати $\varepsilon_n = 4 \cdot 10^{-2}$ [152].

2. За наявності статистичних даних про виникнення пожеж на об'єкті захисту є можливість визначити ймовірність виникнення пожежі для цього

об'єкта на підставі методу короткострокового прогнозу, який розробили автори праці [60]. Він полягає в такому. На підставі динаміки статистичних даних про пожежі за певний період за допомогою математичної статистики отримують залежність для визначення кількості пожеж за цей період. Використовуючи отриману залежність, можна визначити ймовірність виникнення пожежі на період до одного року.

3. Метод аналізу пожежної небезпеки на об'єктах захисту полягає у визначенні наявності горючих речовин і можливих джерел запалювання, ймовірних шляхів поширення пожежі й необхідних засобів пожежогасіння. Цей метод застосовують насамперед для визначення ймовірності виникнення пожежі в цехах механічної обробки деревини. Для механічної обробки деревини в більшості випадків використовують різальні інструменти, які виготовлені із швидкорізальної сталі Р6М5. У процесі різання деревини різальні кромки таких інструментів нагріваються до температури $580^{\circ}\dots 600^{\circ}\text{C}$, а температура спалаху деревини знаходиться в межах $214^{\circ}\dots 255^{\circ}\text{C}$ [238]. Тому в таких цехах на деревообробних верстатах потрібно обробляти деревину, обов'язково охолоджуючи різальні кромки інструментів. Метод охолодження може бути різний: стиснутим струменем газу; збільшенням розмірів (діаметра) інструменту для охолодження завдяки збільшенню часу контакту із зовнішнім середовищем; охолоджувальною рідиною.

Використовуючи розглянуті методи визначення ймовірності виникнення пожежі на деревообробних підприємствах, для кожного об'єкта потрібно визначити значення ймовірності і розробити передусім усі необхідні заходи для його протипожежного захисту. Відтак важливо встановити на цьому об'єкті потрібні протипожежні засоби згідно з наявними нормативними рекомендаціями. Такий підхід дасть змогу значно підвищити пожежну безпеку об'єкта і в разі виникнення пожежі зменшиться тривалість її вільного розвитку та тривалість локалізації і ліквідації, а також збитки від пожежі.

8.2 Складові математичної моделі протипожежного захисту деревообробних підприємств

У сфері пожежної безпеки послуговуються терміном «пожежний ризик», тобто це 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 й оцінювання пожежного ризику, що дає змогу розробляти і впроваджувати відповідні заходи для зменшення його значення до прийняттого. Згідно з рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я [19] і Постановою 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 $\varepsilon > 5 \cdot 10^{-4}$. Своєю чергою, пожежний ризик вказує на відповідну ймовірність оперативної реалізації системи протипожежного захисту у разі виникнення пожежі на об'єкті. Тому, враховуючи дійсне значення пожежного ризику, можна у разі виникнення пожежі на об'єкті визначити очікувану величину втрат та, вживаючи управлінські заходи, мінімізувати наслідки від неї, а також передбачити ефективні компенсаційні заходи.

Визнаємо, що досі фактично науковці не розглядали питань застосування пожежних ризиків для визначення необхідної кількості протипожежних засобів у цехах деревообробних підприємств з метою мінімізації наслідків у разі виникнення пожежі. При цьому невжиття всіх необхідних протипожежних заходів, як показали результати аудиту деревообробних підприємств та аналізу наданим їм відповідних приписів, в більшості випадків призводить до значних збитків. Тому актуальним є питання більш точного прогнозування для цехів деревообробних підприємств з урахуванням пожежних ризиків необхідних протипожежних заходів, аби мінімізувати збитки у разі виникнення пожежі. Розв'язати таку проблему

можна, передусім, розробивши і застосовуючи математичну модель для обґрунтованого забезпечення системою протипожежного захисту об'єкта з урахуванням пожежних ризиків. Зважаючи на той факт, що для цехів деревообробних підприємств не розроблено математичних моделей вибору необхідних протипожежних заходів з урахуванням пожежних ризиків, то розв'язування цієї проблеми є актуальним і своєчасним завданням.

Основним завданням у процесі використання теорії прийняття рішення є вибір оцінки для ухвалення відповідного рішення, тобто вибір певного критерію [159]. Згідно із загальною класифікацією, критеріальні задачі поділяють на класи [150]. Задачі, які пов'язані з визначенням пожежних ризиків для різних об'єктів, можна відносити до третього класу. У цьому разі технічна система повинна функціонувати в різних умовах, з яких для кожної якість функціонування характеризується деякими частковими критеріями. Часткові критерії в 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

$$Z_o + B_o \Rightarrow \min. \quad (8.1)$$

Розглянемо визначення значень складових залежності (8.1). Першою складовою є прямі збитки від пожежі Z_o , які, своєю чергою, залежать безпосередньо від розмірів площі об'єкта Z_{o1} , яка знищена пожежею, і витрат пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі Z_{o2} . У цьому випадку отримаємо

$$Z_o = Z_{o1} + Z_{o2} = C_o S_{\Pi} + C_n \tau_{з.п} N_{\varepsilon}, \quad (8.2)$$

де C_o – вартість одного м² площі об’єкта, яка знищена пожежею, грн/м²; S_{II} – площа пожежі, м²; C_n – вартість однієї хвилини роботи одного пожежно-рятувального відділення в процесі ліквідації пожежі, грн/хв; $\tau_{3,n}$ – тривалість зайнятості пожежно-рятувального підрозділу для ліквідації пожежі, хв; N_g – загальна кількість відділень, яка брала участь у ліквідації пожежі.

Для визначення площі пожежі S_{II} скористаємося залежністю з урахуванням, що тривалість вільного розвитку пожежі $\tau_{6,2} > 10$ хв

$$S_{II} = [25 + \tau_{6,2}(\tau_{6,2} - 10)] \frac{V_{II}^2}{\xi^2} \alpha, \quad (8.3)$$

де $\tau_{6,2}$ – тривалість вільного розвитку пожежі, хв

$$\tau_{6,2} = \tau_{6,6} + \tau_{cn} + \tau_{o,o} + \tau_{3,c} + \tau_{36} + \tau_{cl} + \tau_{роз}; \quad (8.4)$$

$\tau_{6,6}$ – час з моменту виникнення до виявлення пожежі, хв; τ_{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]); $\tau_{3,c}$ – час на залучення сил та засобів гарнізону для гасіння пожежі, хв; ($\tau_{3,c} = 3$ хв згідно з наказом МВС України № 325 від 01.07.1993); τ_{36} – час збору особового складу, хв; ($\tau_{36} = 1$ хв [158]); τ_{cl} – час слідування на пожежу, хв;

$$\tau_{cl} = \frac{60Lk_n}{V_{cl}}; \quad (8.5)$$

L – відстань від пожежно-рятувальної частини до об’єкта, на якому виникла пожежа, км; k_n – коефіцієнт, який враховує не прямолінійність вуличної мережі (у містобудівельній практиці його максимальне значення приймають $k_n = 1,4$); V_{cl} – середня швидкість руху пожежних автомобілів, км/год (у денний час $V_{cl} = 32$ км/год; вночі – до 60 км/год [157]); $\tau_{роз}$ – час

оперативного розгортання, хв; ($\tau_{роз} = 7$ хв [37]); $V_{П}$ – швидкість розповсюдження полум'я пожежі у приміщенні, м/хв; ξ – коефіцієнт, який враховує використання протипожежних перегородок (за відсутності протипожежних перегородок $\xi = 1$; за наявності протипожежних перегородок $\xi = 1,8$); α – 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 скористаємося залежністю

$$\tau_{з.п} = \tau_{о.о} + \tau_{з.с} + \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{роз} + \tau_{лок} + \tau_{г} + \tau_{лік}, \quad (8.6)$$

де $\tau_{о.о}$, $\tau_{з.с}$, $\tau_{зб}$, $\tau_{сл}$, $\tau_{роз}$ – складові, які розглянуто за залежністю (8.4); $\tau_{лок}$ – час локалізації пожежі, хв; $\tau_{г}$ – час гасіння пожежі, хв; $\tau_{лік} = 0,25(\tau_{лок} + \tau_{г})$ – час на закінчення ліквідації пожежі (остаточне гасіння), хв.

Другою складовою залежності (8.1) 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

$$B_o = \left(\sum_{i=1}^n C_i N_i \right) K_{ki}, \quad (8.7)$$

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 критерію Z_o за залежністю (8.1) найбільше впливають такі чинники: $\tau_{в.в}$, $\tau_{сп}$, $\tau_{сл}$ та наявність у цеху протипожежних перегородок. Наприклад, тривалість з моменту виникнення до виявлення пожежі без використання системи пожежної сигналізації у ліпшому випадку становить

6...9 хв [212, 236]. 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 за відсутності пожежного поста з приймально-контрольним пристроєм сповіщення про пожежу в пожежно-рятувальний підрозділ миттєво передати неможливо. Крім того, наявність у цеху протипожежних перегородок або завіс (екранів) значно зменшує швидкість розповсюдження пожежі.

На значення критерію B_o за залежністю (8.1) найбільше впливають також 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 [22–25, 72]. Системи пожежної сигналізації призначені для раннього виявлення пожежі та подавання сигналу тривоги для вжиття необхідних заходів для евакуації людей, виклику пожежно-рятувальних підрозділів, запуску протидимних систем, здійснення управління протипожежними завісами, відімкнення або блокування (розблокування) інших інженерних систем та устаткувань при сигналі «пожежа» тощо. Для управління системами протипожежного захисту необхідно передбачати приміщення пожежного поста безпосередньо в цеху. У 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 із системою їх автоматичного відкриття.

З урахуванням наведеного складу системи протипожежного захисту та рекомендацій [62, 197, 242, 271, 280, 285] розробимо математичну модель пожежного ризику ε_o об'єкта

$$\varepsilon_o = \varepsilon_n P_{\text{л}} \varepsilon_{\text{н.к.л}} \varepsilon_{\text{н.с}} \varepsilon_{\text{н.о}} \varepsilon_{\text{н.з}} \varepsilon_{\text{с.з}} \varepsilon_{\text{е.д}} (1 - P_e) \leq [\varepsilon_o], \quad (8.8)$$

де ε_n – ризик виникнення пожежі у приміщенні цеху (розраховується на підставі статистичних даних для розглядуваного приміщення цеху; за відсутності статистичних даних допускається приймати $\varepsilon_n = 4 \cdot 10^{-2}$ [152]); $P_{\text{л}}$ – імовірність присутності людей у приміщенні

$$P_{\text{л}} = \frac{\tau_{\text{л}}}{24}; \quad (8.9)$$

$\tau_{\text{л}}$ – час присутності людей у цеху, год (в більшості випадків на деревообробних об'єктах робота виконуються у дві зміни, тобто $\tau_{\text{л}} = 16$ год); $\varepsilon_{\text{н.к.л}}$ – ризик відмови приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації; $\varepsilon_{\text{н.с}}$ – ризик відмови пожежного сповіщувача; $\varepsilon_{\text{н.о}}$ – ризик відмови звукового пожежного оповіщувача; $\varepsilon_{\text{н.з}}$ – ризик відмови системи протидимного захисту; $\varepsilon_{\text{с.з}}$ – ризик відмови системи завіси; $\varepsilon_{\text{е.д}}$ – ризик відмови евакуйовальних дверей із системою їх автоматичного відкриття; P_e – імовірність евакуації із приміщення цеху у разі виникнення пожежі

$$P_e = 1 - (1 - P_{\text{е.л}})(1 - P_{\text{е.а}}); \quad (8.10)$$

$P_{e.n}$ – імовірність евакуації людей, які знаходяться в приміщенні цеху, евакуаційними шляхами при реалізації сценарію пожежі; $P_{e.a}$ – імовірність евакуації людей через аварійні виходи або за допомогою інших засобів порятунку (за відсутності даних $P_{e.a}$ допускається приймати 0,03 при наявності аварійних виходів або засобів порятунку та 0,001 – за їх відсутності).

Імовірність евакуації людей $P_{e.n}$ евакуаційним шляхами в зоні виникнення пожежі визначають за залежністю

$$P_{e.n} = \frac{0,8\tau_k - \tau_e}{\tau_{n.e}}, \quad (8.11)$$

де τ_k – критичний час пожежі, хв; (критичний час пожежі визначають з урахуванням небезпечних факторів пожежі, але, як показують результати аналізу статистичних даних пожеж у цехах деревообробних підприємств, його значення коливається в межах 5...10 хв); τ_e – час евакуації, хв; $\tau_{n.e}$ – час від початку пожежі до початку евакуації, хв (за наявності в приміщенні цеху системи оповіщення про пожежу $\tau_{n.e} = 1...2$ 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 визначенні імовірності евакуації людей $P_{e.n}$ евакуаційними шляхами в зоні виникнення пожежі за залежністю (8.11) необхідно враховувати такі положення [212, 269]:

1) у випадку, коли $\tau_e < 0,8\tau_k < \tau_e + \tau_{n.e}$, то $P_{e.n}$ визначають за залежністю (8.11);

2) у випадку, коли $\tau_e + \tau_{n.e} \leq 0,8\tau_k$, то $P_{e.n} = 0,999$;

3) у випадку, коли $\tau_e \geq 0,8\tau_k$, то $P_{e.n} = 0$.

Час евакуації τ_e визначають за залежністю

$$\tau_e = \frac{l_e}{k_{\delta} V_{e,\delta}}, \quad (8.12)$$

де l_e – шлях евакуації, м;

$$l_e = k_{кр} \sqrt{L_{np}^2 + B_{np}^2}; \quad (8.13)$$

$k_{кр} = 1,4$ – коефіцієнт, який враховує кривизну шляху евакуації в зоні виникнення пожежі; L_{np} – довжина проходу цеху в зоні виникнення пожежі, м; B_{np} – ширина проходу, м; $V_{e,\delta}$ – дійсна середня швидкість евакуації, м/хв;

$$V_e = 49,5 - 9,27 \ln[-\lg(0,1 + 1,284 k_{em})]; \quad (8.14)$$

k_{em} – коефіцієнт, який враховує емоціональний стан людей, яких евакуюють; значення цього коефіцієнта знаходиться в межах $k_{em} = 0 \dots 0,7$ (за відсутності емоціонального стану $k_{em} = 0$) [152]; k_{δ} – кількість евакуаційних виходів.

Розглянемо значення складових математичної моделі пожежного ризику (8.8), які ще не визначалися. Для цього скористаємося основними положеннями теорії надійності при визначенні імовірності безвідмовної роботи $R(\tau)$ відповідного елемента системи протипожежного захисту або імовірності його відмови $F(\tau)$.

Ризик відмови приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації $\varepsilon_{n.k.n}$. Відповідно до основних положень теорії надійності імовірність відмови електронної апаратури підпорядковується експоненціальному закону розподілу з густиною розподілу $f(\tau) = \lambda \exp(-\lambda \tau)$ [78]. У цьому випадку отримуємо

$$\varepsilon_{n.k.n} = \int_0^{\tau} \lambda_{n.k.n} e^{-\lambda \tau} d\tau = 1 - e^{-\lambda \tau} = 1 - \exp(-\lambda_{n.k.n} \tau), \quad (8.15)$$

де τ – час роботи приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації з початку експлуатації, год; $\lambda_{n.k.n}$ – інтенсивність його відмов, год⁻¹;

$$\lambda_{n.k.n} = \frac{1}{T_B}; \quad (8.16)$$

T_B – час напрацювання приймально-контрольного пристрою на відмову (згідно з ДСТУ EN 54-2:2003 час безперервної роботи до відмови становить 10 років), год, тобто

$$T_B = 10 \cdot 365 \cdot 24 = 87600 \text{ год};$$

$$\lambda_{n.k.n} = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}. \quad (8.17)$$

Ризик відмови пожежного сповіщувача $\varepsilon_{n.c}$. Згідно з ДСТУ EN 54-5:2003 час T_B напрацювання сповіщувача на відмову (час безперервної роботи) дорівнює 10 рокам. Тоді інтенсивність відмови сповіщувача дорівнюватиме

$$\lambda_{n.c} = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}. \quad (8.18)$$

У цьому випадку ризик відмови пожежного сповіщувача буде

$$\varepsilon_{n.c} = 1 - \exp(-\lambda_{n.c} \tau), \quad (8.19)$$

де τ – сумарний час очікування пожежного сповіщувача до початку подачі сигналу про пожежу, год.

Водночас значення цього ризику необхідно уточнити введенням поправочного коефіцієнта $\delta_{n.c}$, який залежить від встановлення в цеху потрібної кількості пожежних сповіщувачів згідно з рекомендаціями [72]. У підсумку отримаємо

$$\varepsilon_{n.c} = [1 - \exp(-\lambda_{n.c} \tau)] \delta_{n.c}; \quad (8.20)$$

$$\delta_{n.c} = \frac{N_{n.c}}{N_{n.c.o}}, \quad (8.21)$$

де $N_{n.c}$ – потрібна кількість пожежних сповіщувачів для приміщення цеху, шт.; $N_{n.c.o}$ – дійсна кількість пожежних сповіщувачів у цеху, шт.

Своєю чергою, потрібну кількість пожежних сповіщувачів для приміщення цеху можна визначити з урахуванням рекомендацій [72]

$$N_{n.c} = \frac{L_u B_u}{S_{n.c}}, \text{ (заокр. до ціл. числа в біл. стор.)} \quad (8.22)$$

де L_u – довжина внутрішнього об'єму приміщення цеху, м; B_u – ширина внутрішнього об'єму приміщення цеху, м; $S_{n.c}$ – площа, яку контролює один сповіщувач, м² (згідно з ДБН В.2.5-56:2014 п. 7.2.11 $S_{n.c} = 49$ м²).

Ризик відмови звукового пожежного оповіщувача $\varepsilon_{n.o}$. Згідно з 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 становитиме

$$\lambda_{n.o} = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{100} = 10^{-2} \text{ год}^{-1}. \quad (8.23)$$

У цьому випадку ризик відмови звукового пожежного оповіщувача визначаємо з урахуванням наявності в цеху потрібної і дійсної кількості пожежних оповіщувачів, тобто з урахуванням коефіцієнта $\delta_{n.o}$

$$\varepsilon_{n.o} = [1 - \exp(-\lambda_{n.o} \tau)] \delta_{n.o}; \quad (8.24)$$

$$\delta_{n.o} = \frac{N_{n.o}}{N_{n.o.d}}, \quad (8.25)$$

де τ – сумарний час роботи оповіщувача з початку експлуатації, год; $N_{n.o}$ – потрібна кількість пожежних оповіщувачів для приміщення цеху, шт.; $N_{n.o.d}$ – дійсна кількість пожежних оповіщувачів у цеху, шт.

Значення $N_{n.o}$ можна визначити з урахуванням рекомендацій ДСТУ EN 54-3:2003 п. 4.6.2, де вказано, що площа, яку обслуговує один оповіщувач $S_{n.o} = 72 \text{ м}^2$. Тоді

$$N_{n.o} = \frac{L_u B_u}{S_{n.o}} \text{ (заокр. до ціл. чис. в біл. стор.)} \quad (8.26)$$

Ризик відмови системи протидимного захисту $\varepsilon_{n.z}$. Імовірність відмови системи протидимного захисту підпорядковується нормальному закону розподілу з густиною розподілу [78]

$$f(\tau) = \frac{1}{S_\tau \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau - m_\tau)^2}{2S_\tau^2}}, \quad (8.27)$$

де S_τ – середнє квадратичне відхилення напрацювання τ ; m_τ – математичне сподівання напрацювання τ .

З урахуванням наявних даних по часу напрацювання протипожежних засобів до відмови приймаємо для системи протидимного захисту $T_B = 100$ год. Виходячи з цього значення середнє квадратичне відхилення буде $S_\tau = 16,7$ год, а математичне сподівання – $m_\tau = 50$ год.

У цьому випадку ризик відмови протидимного пристрою визначаємо з урахуванням наявності в цеху потрібної і дійсної кількості протидимних пристроїв, тобто з урахуванням коефіцієнта $\delta_{n.z}$ [253, 306]. Тоді значення ризику можна виразити через функцію Лапласа

$$\varepsilon_{n.3} = [0,5 + \Phi(u)] \delta_{n.3}, \quad (8.28)$$

де $\Phi(u)$ – функція Лапласа, яка є непарною; $\Phi(-u) = -\Phi(u)$; u – квантиль нормального розподілу

$$u = \frac{\tau - m_\tau}{S_\tau}; \quad (8.29)$$

$$\delta_{n.3} = \frac{N_{n.3}}{N_{n.3.0}}; \quad (8.30)$$

$$N_{n.3} = \frac{L_u B_u}{S_{n.3}} \text{ (заок. до ціл. чис. в біл. стор.)}, \quad (8.31)$$

де $N_{n.3}$ – потрібна кількість протидимних пристроїв для приміщення цеху, шт.; $N_{n.3.0}$ – дійсна кількість протидимних пристроїв у цеху, шт.; $S_{n.3}$ – площа цеху, яка обслуговується одним димоприймальним пристроєм (згідно з ДБН В.2.5-56:2014 п. 10.4.2 $S_{n.3} = 900 \text{ м}^2$).

Для визначення функції Лапласа необхідно спочатку визначити квантиль нормального розподілу за залежністю (8.29) для відповідного часу τ , а потім, використовуючи довідникову літературу, у якій розміщені таблиці функції Лапласа, вибрати значення $\Phi(u)$.

Ризик відмови системи завіси $\varepsilon_{c.3}$. 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. У цьому випадку ризик відмови системи завіс визначаємо з урахуванням наявності в цеху потрібної і дійсної їх кількості та з урахуванням коефіцієнта $\delta_{c.3}$. Значення ризику визначаємо через функцію Лапласа

$$\varepsilon_{c.3} = [0,5 + \Phi(u)] \delta_{c.3}. \quad (8.32)$$

Значення квантиля нормального розподілу u визначаємо за залежністю (8.29) при $S_\tau = 16,7$ год і $m_\tau = 50$ год. Значення коефіцієнта $\delta_{c.3}$ визначаємо за залежностями

$$\delta_{c.3} = \frac{N_{c.3}}{N_{c.3,d}}; \quad (8.33)$$

$$N_{c.3} = \frac{L_u B_u}{S_{c.3}} \text{ (заок. до ціл. чис. в біл. стор.)}, \quad (8.34)$$

де $N_{c.3}$ – потрібна кількість систем завіс для приміщення цеху, шт.; $N_{c.3,d}$ – дійсна кількість систем завіс у цеху, шт.; $S_{c.3}$ – площа цеху, яка обслуговується однією системою завіс (згідно з ДБН В.2.5-56:2014 п. 10.4.3 $S_{c.3} = 1600 \text{ м}^2$).

Ризик відмови евакуйовальних дверей із системою їх автоматичного відкриття $\varepsilon_{e,d}$. Головною системою евакуйовальних дверей є пристрій для автоматичного їх відкривання, який спрацьовує від сигналу системи пожежних сповіщувачів. Згідно з паспортом на цей пристрій гарантійний термін безвідмовної роботи становить один рік, тобто $T_B = 8760$ год = 525 600 хв. Тоді $\lambda_{e,d} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ хв}^{-1}$, що дозволяє визначити значення ризику

$$\varepsilon_{e,d} = 1 - \exp(-\lambda_{e,d} \tau). \quad (8.35)$$

Під час аудиту об'єкта щодо забезпечення його протипожежними засобами потрібно використовувати математичну модель пожежного ризику (8.8). У разі відсутності будь-якого компонента системи, який необхідно враховувати в залежності (8.8), потрібно замість цієї складової підставити цифру 1.

Якщо під час визначення пожежного ризику для об'єкта за залежністю (8.8) буде встановлено, що отриманий результат не задовольняє допустимого значення пожежного ризику, то необхідно насамперед проаналізувати всі розраховані коефіцієнти δ_i . На підставі результатів аналізу цих коефіцієнтів необхідно розробити заходи на доукомплектування об'єкта протипожежними засобами, щоб наблизити значення коефіцієнтів до одиниці, керуючись також прийнятим критерієм (8.1) для мінімізації збитків у разі виникнення пожежі. При цьому необхідно доукомплектовувати такими компонентами, які забезпечували б мінімум витрат за залежністю (8.7).

Крім цього, у разі вичерпання терміну експлуатації елементів системи значення кожного відповідного ризику наблизатиметься до (0,632), що не дозволить забезпечити допустимого значення пожежного ризику. Тому, розробляючи заходи на доукомплектування об'єкта протипожежними засобами, потрібно також враховувати заміну елементів, термін використання яких закінчується.

8.3 Математична модель визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту на деревообробних підприємствах

У попередньому підрозділі ми отримали залежності, необхідні для розроблення математичної моделі визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту на деревообробних підприємствах. Тому, використовуючи ці залежності, переходимо до розроблення математичної моделі [34, 35, 113, 120, 121, 126].

Розроблення оптимізаційної математичної моделі визначення методів і засобів протипожежного захисту для об'єкта з урахуванням допустимого значення пожежного ризику.

Функція мети

$$\varepsilon_o \Rightarrow \min \leq [\varepsilon_o]; \quad (8.36)$$

за критерієм

$$B = Z_o + B_o \Rightarrow \min; \quad (8.37)$$

за обмеженнями

$$a_1 \leq \delta_{n.c} \leq b_1; \quad (8.38)$$

$$a_2 \leq \delta_{n.o} \leq b_2; \quad (8.39)$$

$$a_3 \leq \delta_{n.3} \leq b_3; \quad (8.40)$$

$$a_4 \leq \delta_{c.3} \leq b_4; \quad (8.41)$$

$$p \geq [p], \quad (8.42)$$

де a_1, a_2, a_3, a_4 – мінімальні значення обмежень; $b_1, b_2 \dots b_4$ – максимальні значення обмежень; p – імовірність потрапляння досліджуваної i -ї точки в область допустимих розв’язків ($p = k/N$, де k – кількість циклів роботи програми, при яких досліджувані точки потрапили в область допустимих розв’язків; N – загальна кількість циклів роботи програми); $[p]$ – допустиме значення 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 (8.38)...(8.41) буде в тому випадку, коли встановлена в цеху кількість протипожежних засобів відповідає нормативним вимогам. За аналогією приймаємо максимальне значення обмежень b_1, b_2, b_3, b_4 такими, що дорівнюють 15.

Для розв’язування оптимізаційної моделі скористаємося методом Монте-Карло. Область допустимих розв’язків, яка визначається обмеженнями (8.38)...(8.41), оточують m -мірним паралелепіпедом, у якому проводимо дослідження. Поставлену задачу найкраще розв’язувати з

використанням комп'ютера. За допомогою давача комп'ютера утворюють послідовність псевдовипадкових чисел μ_{ji} в інтервалі $0 \dots 1$. Для перетворення псевдовипадкових чисел μ_{ji} , які рівномірно розподілені в інтервалі $0 \dots 1$, до значень δ_i використовуємо залежності виду, наприклад, для $\delta_{n.c.i}$

$$\delta_{n.c.i} = a_1 + \mu_{1i}(b_1 - a_1),$$

де μ_{1i} – псевдовипадкове число для визначення чинника $\delta_{n.c.i}$ на певному i -тому циклі розрахунку.

У процесі розрахунку на кожному циклі роботи програми визначаємо значення ε_o за залежністю (8.8) та критерії Z_o і B_o , які порівнюємо зі значеннями попереднього циклу. Ці процедури виконуємо доти, доки буде виконана умова (8.42). Після завершення роботи програми на друк видаються такі дані: ε_o , $\tau_{в.з.}$, S_{Π} до і після впровадження протипожежних засобів; $V_{сл}$, $\tau_{сл}$, $\tau_{лок}$, τ_z , $\tau_{лік}$, p ; типи протипожежних засобів, їх вартість і кількість та загальні додаткові витрати на їх придбання.

8.4 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:

- ширину цеху $B_{ц}$, м;
- довжину цеху $L_{ц}$, м;
- кількість пожежних відсіків у цеху Π , шт.;
- дійсну кількість пожежних сповіщувачів у цеху $N_{n.c.д}$, шт.;
- сумарний час очікування пожежного сповіщувача $\tau_{n.c.}$, год;
- площу, яку контролює один сповіщувач $S_{n.c.}$, м²;
- дійсну кількість пожежних оповіщувачів у цеху $N_{n.o.д}$, шт.;
- сумарний час роботи оповіщувача $\tau_{n.o.}$, год;

площу, яку контролює один оповіщувач $S_{n.o}$, м²;
 наявність приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації
 $П_k$, шт.;
 час роботи приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації
 з початку експлуатації $\tau_{n.k.n}$, год;
 дійсну кількість протидимних пристроїв у цеху $N_{n.з.д}$, шт.;
 сумарний час роботи протидимних пристроїв $\tau_{n.з}$, год;
 площу цеху, яка обслуговується одним димоприймальним пристроєм
 $S_{n.з}$, м²;
 дійсну кількість систем завіс у цеху $N_{c.з.д}$, шт.;
 площу цеху, яка обслуговується однією системою завіс $S_{c.з}$, м²;
 сумарний час роботи завіси $\tau_{c.з}$, год;
 наявність евакуйовальних дверей із системою їх автоматичного
 відкриття $ЕД$, шт.;
 тривалість роботи $ЕД$ в період евакуації $\tau_{e.д}$, хв;
 $ВД$ – кількість звичайних дверей для виходу, шт.;
 τ_l , год – час присутності людей в цеху;
 C_o , грн/м² – 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;
 α – кутовий коефіцієнт, який враховує форму пожежі;
 L , км – відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта;
 V_{cl} , км/год – швидкість руху пожежного автомобіля;
 N_e – загальна кількість відділень, яка бере участь у ліквідації пожежі;
 P_e – імовірність евакуації людей;
 $[\epsilon_o]$ – допустиме значення пожежного ризику;
 $[p]$ – допустиме значення імовірності потрапляння досліджуваної i -ї
 точки в область допустимих розв'язків.

Початок блок-схеми алгоритму визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту для деревообробних підприємств зображено на рис. 8.1.

Після введення вхідних даних у 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 у цеху та визначення ризику їх відмови, перевірка наявності пожежних відсіків у цеху.

Для виконання наведених операцій використовується 16 блоків. Після цього процес продовжується з блоку 17 (рис. 8.2).

У блоках 17 і 18 визначається ризик відмови систем завіси. Після цього виконується перевірка наявності евакуйовальних дверей із системою їх автоматичного відкриття та визначення ризику їх відмови, визначення існуючого значення пожежного ризику для об'єкта і порівняння з допустимим значенням. Наступним кроком є визначення максимально прогнозованої тривалості вільного горіння та відповідних значень обмежень на обмеження (8.38)...(8.41), присвоєння номера циклу роботи комп'ютера $N_i = N_i + 1$, генерація псевдовипадкових чисел та визначення для відповідного циклу роботи комп'ютера значень δ_i . Робота цієї частини блок-схеми закінчується на блоці 37а.

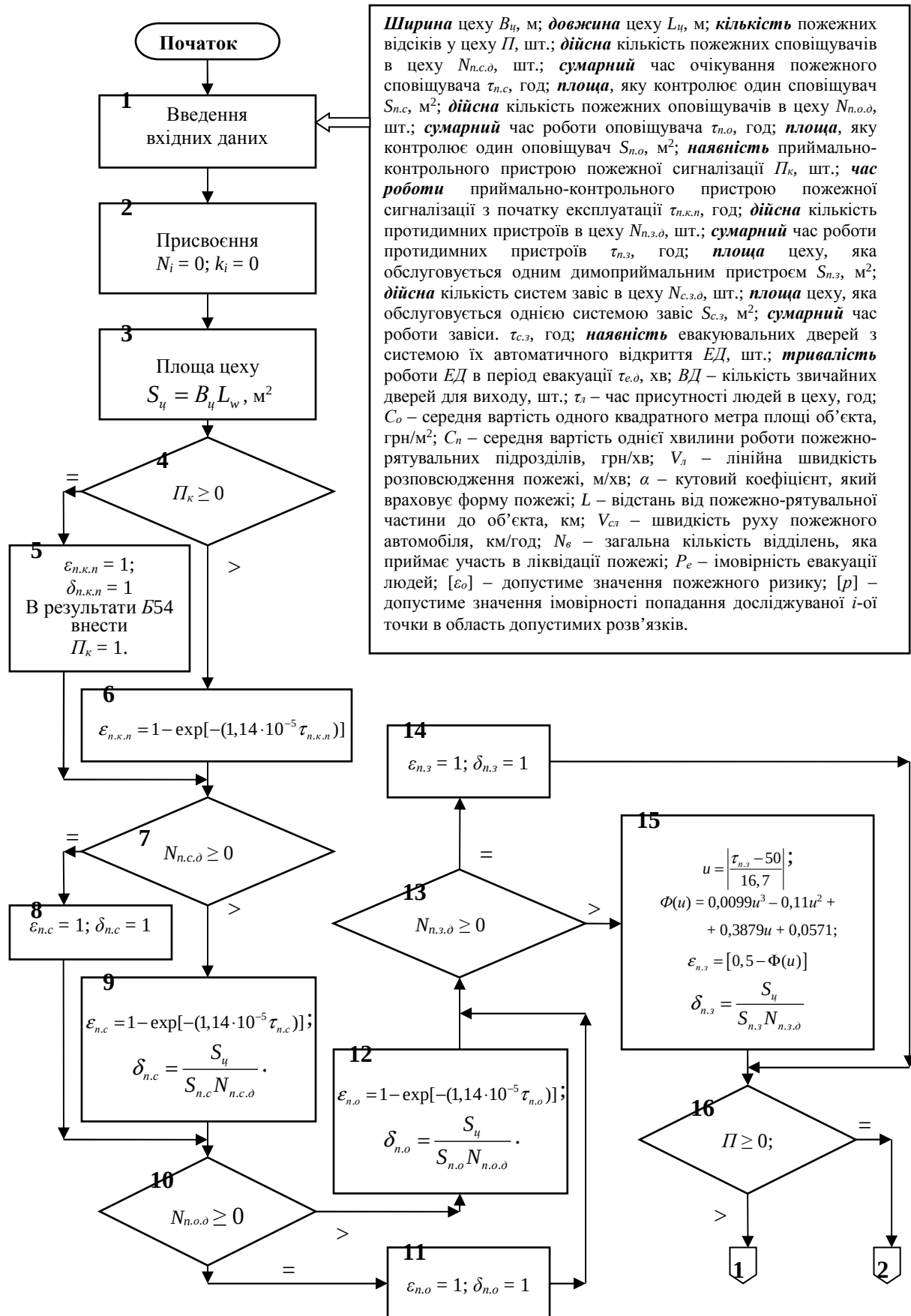


Рис. 8.1. Блок-схема алгоритму визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту на деревообробних підприємствах (початок)

Продовження блок-схеми починається з блоку 38 (рис. 8.3). У блоках 38–44 визначаються ризики відмови всіх протипожежних засобів, які необхідні для розміщення в цеху. На підставі отриманих даних у блоці 45 визначається значення пожежного ризику для об'єкта. Після цього порівнюють значення пожежного ризику з допустимим. У разі виконання умови визначають необхідну додаткову кількість протипожежних засобів для забезпечення пожежного ризику об'єкта.

У 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 у блоці 49а виконується перехід до блоку 50 (рис. 8.4).

У блоці 50 виконується перевірка значення критерію оптимізації і перехід до наступних блоків, у яких визначають значення імовірності потрапляння досліджуваної i -ї точки в область допустимих розв'язків та виконується порівняння з допустимим. Після цього виконується роздрук результатів.

На підставі розробленої блок-схеми алгоритму визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств була написана програма на мові C# для роботи в середовищі Windows XP (додаток А6) [129]. Час роботи комп'ютера становив 6-8 с для 5 тисяч випробувань (N_i – циклів) при імовірності потрапляння досліджуваної i -ї точки в область допустимих розв'язків $p = 0,90 \dots 0,96$. Робоче вікно програми зображено на рис. 8.5.

Для роботи програми потрібно ввести вхідні дані в робоче вікно згідно із запитом, який розміщений з лівого боку вікна. Після цього, за потреби, увімкнути кроковий обрахунок і натиснути рахувати.

Результати розрахунку (роздрук) буде наведено у правому вікні. Для докладного розгляду роботи програми розглянемо приклад розрахунку.

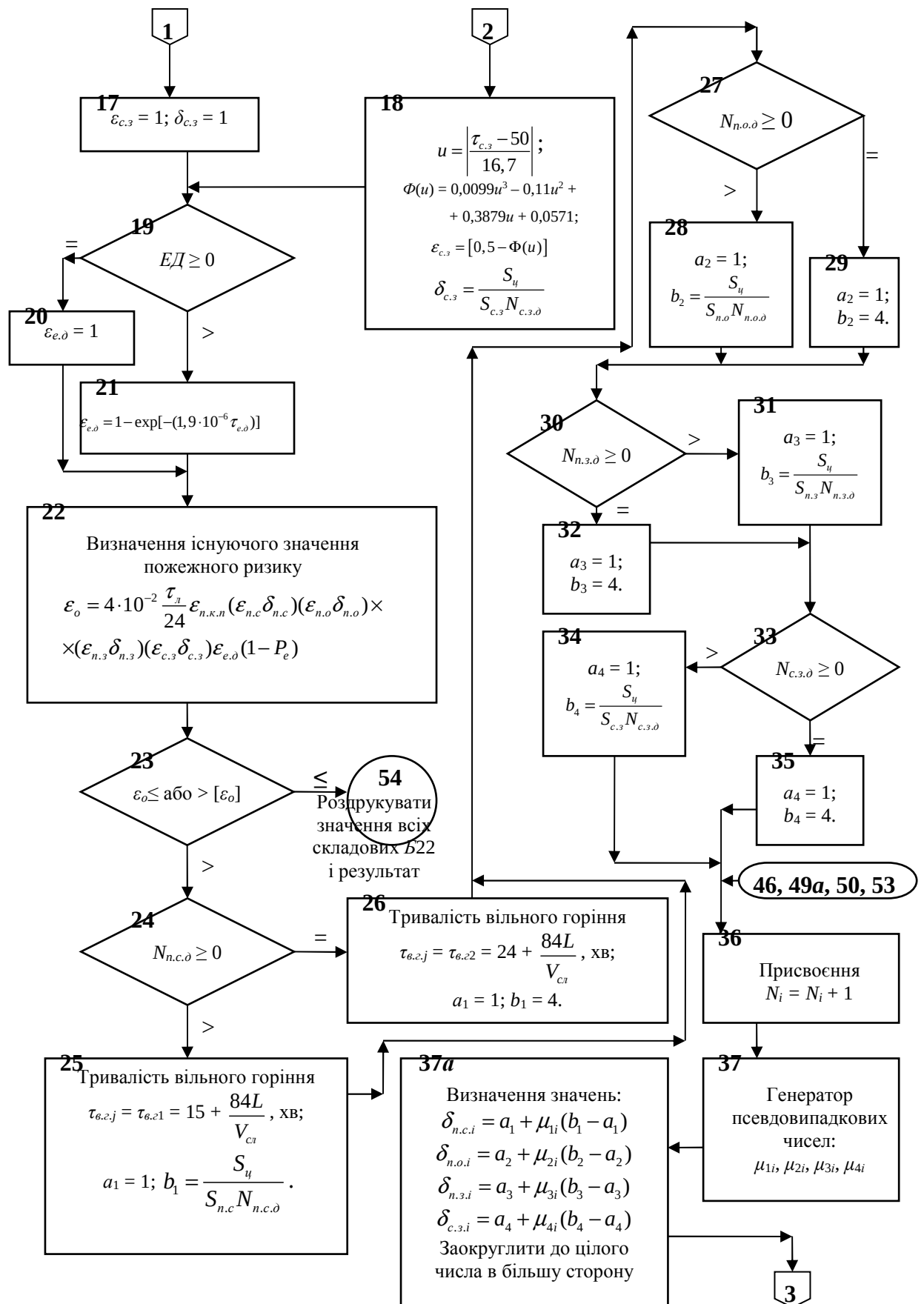


Рис. 8.2. Блок-схема алгоритму визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств (продовження)

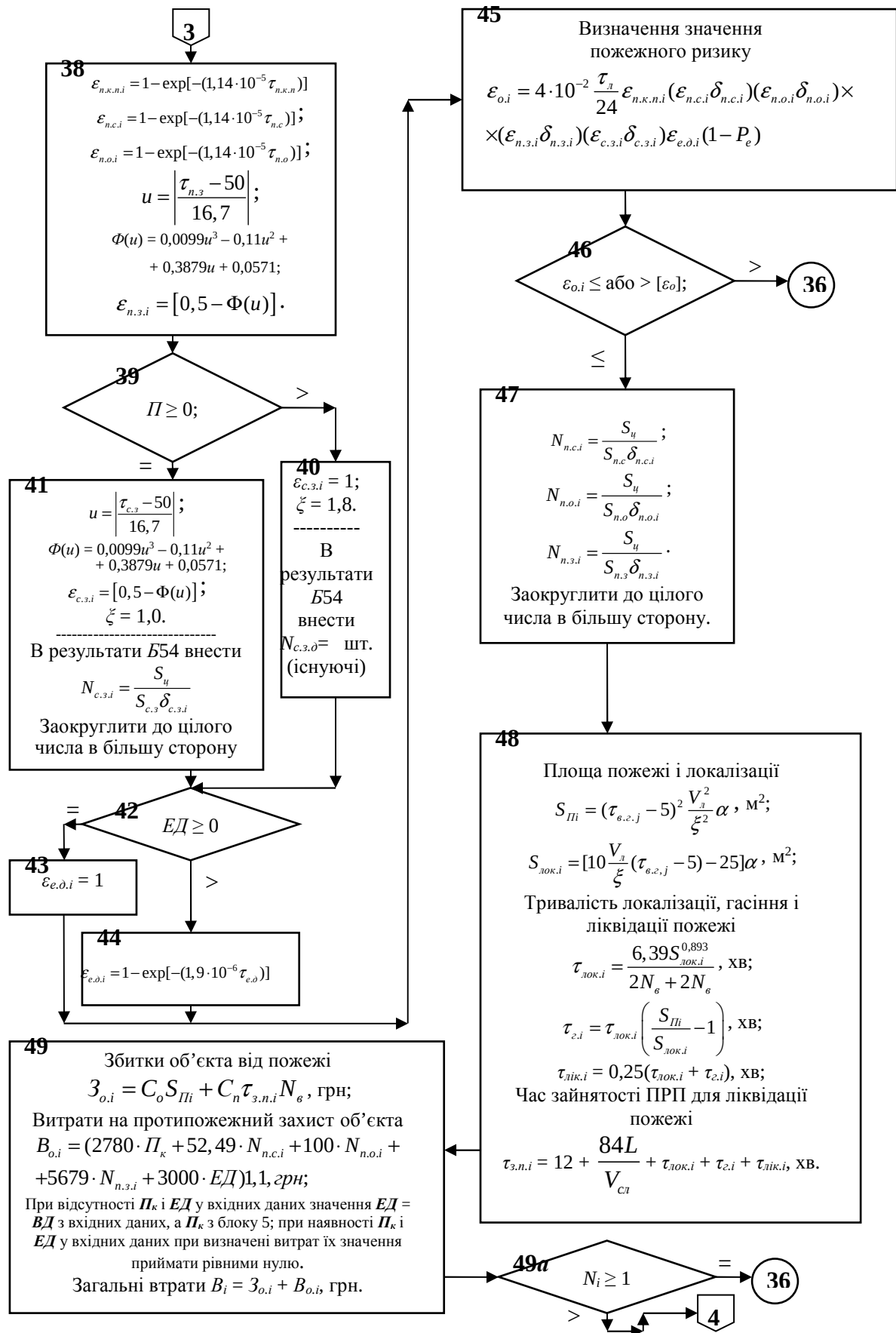


Рис. 8.3. Блок-схема алгоритму визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств (продовження)

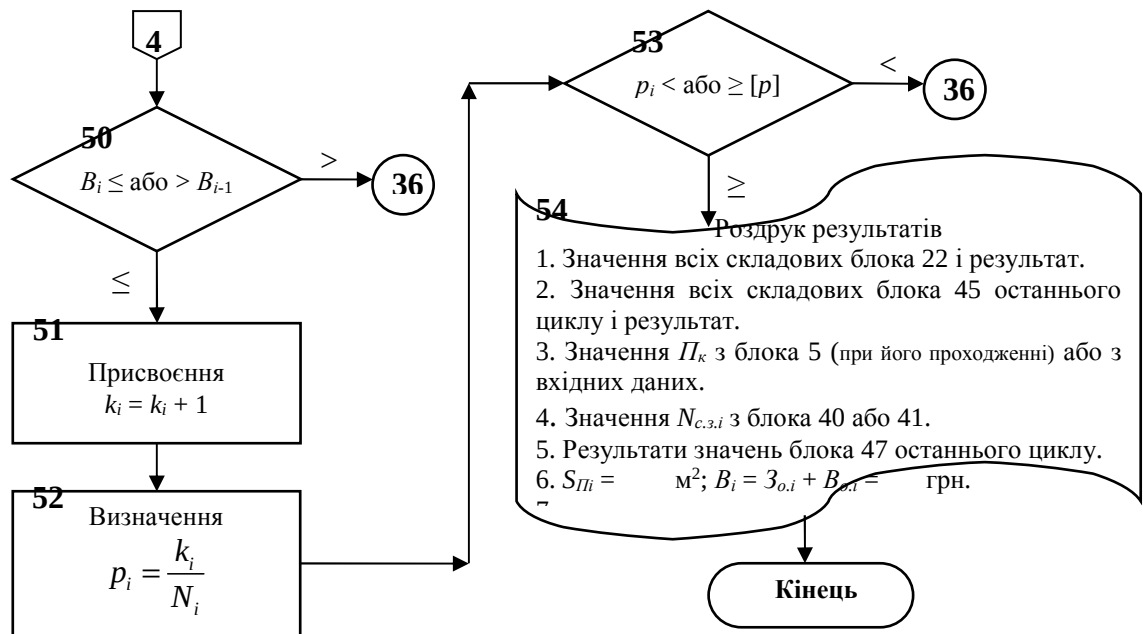


Рис. 8.4. Блок-схема алгоритму визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств (закінчення)

Алгоритм розрахунку протипожежних засобів

Ширину цеху В_ц, м =
 Довжину цеху L_ц, м =
 Кількість пожежних відсіків у цеху П, шт =
 Дійсна кількість пожежних сповіщувачів в цеху N_{п.с.д}, шт =
 Сумарний час очікування пожежного сповіщувача т_{п.с}, год =
 Площа, яку контролює один сповіщувач S_{п.с}, м² =
 Дійсна кількість пожежних оповіщувачів в цеху N_{п.о.д}, шт =
 Сумарний час роботи оповіщувача т_{п.о}, год =
 Площа, яку контролює один оповіщувач S_{п.о}, м² =
 Наявність приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації Пк =
 Час роботи приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації з початку експлуатації т_{п.к.п}, год =
 Дійсна кількість протидимних пристроїв в цеху N_{п.з.д}, шт =
 Сумарний час роботи протидимних пристроїв т_{п.з}, год =
 Площа цеху, яка обслуговується одним димоприймальним пристроєм S_{п.з}, м² =
 Дійсна кількість систем завіс в цеху N_{с.з.д}, шт =
 Площа цеху, яка обслуговується однією системою завіс S_{с.з}, м² =
 Сумарний час роботи завіси. т_{с.з}, год =
 Наявність евакуйовувальних дверей з системою їх автоматичного відкриття ЕД =
 Тривалість роботи ЕД в період евакуації т_{ед}, хв;
 Кількість звичайних дверей для виходу, шт.;
 Час присутності людей в цеху т_л, хв =
 Середня вартість одного квадратного метра площі об'єкта;
 Середня вартість однієї хвилини роботи пожежно-рятувальних підрозділів;
 Лінійна швидкість розповсюдження пожежі, м/с;
 Кутловий коефіцієнт, який враховує форму пожежі;
 Відстань від пожежно-рятувальної частини до об'єкта, м
 Швидкість руху пожежного автомобіля, км/год
 Загальна кількість відділень, яка приймає участь в ліквідації пожежі, шт
 Імовірність евакуації людей;
 Допустиме значення пожежного ризику;
 Допустиме значення імовірності попадання досліджуваної і-ої точки в область допустимих розв'язків.

☐ Кроковий обчислюнок ☐ Відні дані

Рахувати Приклад Очистити

Рис. 8.5. Робоче вікно програми для визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств

Приклад. Провести аудит деревообробного цеху для визначення існуючого значення пожежного ризику та за необхідності, з метою забезпечення його допустимого значення, вибрати потрібні протипожежні засоби.

Вхідні дані:

ширина цеху $B_{ц} = 72$ м;

довжина цеху $L_{ц} = 144$ м;

кількість пожежних відсіків у цеху $\Pi = 4$ шт.;

дійсна кількість пожежних сповіщувачів у цеху $N_{n.c.d} = 20$ шт.;

сумарний час очікування пожежного сповіщувача $\tau_{n.c} = 17\,520$ год;

площа, яку контролює один сповіщувач $S_{n.c} = 49$ м²;

дійсна кількість пожежних оповіщувачів у цеху $N_{n.o.d} = 0$ шт.;

сумарний час роботи оповіщувача $\tau_{n.o} = 0$ год;

площа, яку контролює один оповіщувач $S_{n.o} = 72$ м²;

наявність приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації $\Pi_k = 1$ шт.;

час роботи приймально-контрольного пристрою пожежної сигналізації з початку експлуатації $\tau_{n.k.n} = 17\,520$ год;

дійсна кількість протидимних пристроїв у цеху $N_{n.z.d} = 2$ шт.;

сумарний час роботи протидимних пристроїв $\tau_{n.z} = 2$ год;

площа цеху, яка обслуговується одним димоприймальним пристроєм $S_{n.z} = 900$ м²;

дійсна кількість систем завіс у цеху $N_{c.z.d} = 0$ шт.;

площа цеху, яка обслуговується однією системою завіс $S_{c.z} = 1600$ м²;

сумарний час роботи завіси $\tau_{c.z} = 2$ год;

наявність евакуйовальних дверей зі системою їх автоматичного відкриття $ED = 0$ шт.;

тривалість роботи ED в період евакуації $\tau_{e.d}$, хв;

$BD = 6$ – кількість звичайних дверей для виходу, шт.;

$\tau_l = 16$ год – час присутності людей у цеху;

$C_o = 2500$ грн/м² – середня вартість одного квадратного метра площі об'єкта;

$C_n = 67$ грн/хв – середня вартість однієї хвилини роботи пожежно-рятувальних підрозділів;

$V_{\text{л}} = 1,3$ 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;

$V_{\text{сл}} = 32$ км/год – швидкість руху пожежного автомобіля;

$N_{\text{с}} = 2$ – загальна кількість відділень, яка бере участь у ліквідації пожежі;

$P_e = 0,4$ – імовірність евакуації людей;

$[\varepsilon_o] = 0,00005$ – допустиме значення пожежного ризику;

$[p] = 0,9$ – допустиме значення імовірності потрапляння досліджуваної i -ї 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. 8.6).

Результат аналізу отриманих розрахунків для визначення протипожежних засобів показує:

1. Пожежний ризик для існуючого цеху без переобладнання протипожежними засобами становить $\varepsilon_o = 0,0000543$, що перебільшує допустиме значення.

2. Кількість пожежних сповіщувачів рекомендуємо збільшити до 27 штук.

3. Пожежних оповіщувачів рекомендуємо встановити в цеху 72 штуки.

4. Кількість протидимних пристроїв рекомендуємо збільшити до 3 штук.

5. Після проведення цих заходів значення пожежного ризику зменшиться до $2 \cdot 10^{-9}$.

Алгоритм розрахунку протипожежних засобів

Ширина цеху Вц, м =	72
Довжина цеху Lц, 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 і-ої точки в область допустимих розв'язків.	0,9

☒ Кроковий обчислюнок
 ☐ Вхідні дані

bcz = 1
eed = 1
Pe = 0,4
eo = 0,0000543

2 Блок 45. Визначення значення пожежного ризику
eoi = 2E-09
ti = 16
enkti = 0,181
encl = 0,181
bncl = 8
enoi = 0,095
bnoi = 2enzi = 0,002
bnzi = 5
eczi = 1
bczi = 3
eedi = 0,0001
Pe = 0,4

Результати обчислень 48 блоку:
Площа пожежі SPi = 88,8 м2.
Площа локалізації пожежі Sloki = 63,9 м2.
Тривалість локалізації tlaki = 32,7 хв
Тривалість гасіння thi = 13 хв
Тривалість остаточної ліквідації пожежі tlaki = 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 Nczi=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. 8.7. Результат розрахунку для визначення протипожежних засобів

6. За таких умов площа пожежі у разі її виникнення буде не більшою ніж 88,8 м², 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 231 803,4 грн, а витрати на придбання протипожежних засобів, які відсутні в цеху, становлять 51 077,7 грн.

Тож можна зробити висновок, що розроблена система для визначення заходів підвищення ефективності протипожежного захисту деревообробних підприємств повністю забезпечує поставлену мету.

8.5 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

$$E = Z_1 - Z_2, \quad (8.43)$$

де Z_1 , Z_2 – відповідно прямі збитки від пожеж до і після впровадження розроблених методів і рекомендацій у практику пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС, грн.

Для виконання розрахунків за залежністю (8.43) розглянемо вплив кожної складової розглянутих рекомендацій на зміну чинників, які впливають на параметр Z_2 . Результати статистичного аналізу численних обстежень за даними розроблених рекомендацій наведено в табл. 8.1.

Прямі збитки від пожеж Z_1 до впровадження розроблених методів і рекомендацій у практику пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС приймаємо як середньостатистичні дані від зареєстрованих пожеж на деревообробних підприємствах [16, 17, 100–102], а саме $Z_1 = 71\,329$ грн на одну пожежу. Прямі збитки від пожеж Z_2 після впровадження методів і рекомендацій у практику пожежно-рятувальних підрозділів визначаємо за залежністю

$$Z_2 = Z_1 \left(1 - \frac{\Delta S}{100} \right) = 71329 \left(1 - \frac{78,5}{100} \right) = 15336 \text{ грн на одну пожежу.} \quad (8.44)$$

Таблиця 8.1

Результати статистичного аналізу

№ з/п	Розроблені методи і засоби	Ефективність розробки	Числовий вплив на ефективність	Зменшення площі пожежі ΔS , %
1	Обґрунтування оптимальних розмірів пожежних відсіків для цеху	Зменшує швидкість розповсюдження пожежі	Зменшує V_L в 1,8 разу	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
Всього				78,5

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

$$E = Z_1 - Z_2 = 71329 - 11226 = 60103 \text{ грн.}$$

З уваги на те, що в Україні, за статистичними даними, на деревообробних підприємствах виникає 90...100 пожеж за рік [16, 17], економічний ефект за рік, за рахунок зменшення прямих збитків від пожеж та впровадження розроблених рекомендацій, становитиме

$$E_{\Sigma} = 60103 \cdot 95 = 5709785 \text{ грн.}$$

Висновки

1. Розроблено математичну модель для визначення кількості всіх необхідних засобів протипожежного захисту об'єкта, яка дає змогу розробляти і впроваджувати заходи для ефективного захисту деревообробних підприємств у разі виникнення пожежі.

2. Розроблена на основі математичної моделі блок-схема алгоритму для визначення кількості всіх необхідних засобів протипожежного захисту об'єкта дозволила написати програму на мові C# і тим самим розробити систему, яку можна також використовувати під час проведення аудиту деревообробних підприємств і напрацюванні заходів для протипожежного захисту об'єкта.

3. Розроблені в дисертаційній роботі методи і рекомендації після повного впровадження в пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України дозволять отримати економічний ефект в сумі 5 709 785 грн.

ВИСНОВКИ

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

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

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

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

2. Вперше розроблено оптимізаційну математичну модель і пакет прикладних програм для визначення оптимальної кількості і площі пожежних відсіків у закритих приміщеннях деревообробних цехів. Доказано,

що використання пожежних відсіків зменшує швидкість поширення пожежі в закритому приміщенні цеху в 1,8 разу. Для обґрунтованого підтвердження цього висновку використовували удосконалену для досліджень пожежних ситуацій у деревообробному цеху систему FDS, яка дозволила визначати критичний час пожежі, швидкість поширення пожежі, температурні поля та виділення диму і токсичних речовин.

3. Результати досліджень тривалості поширення пожежі в закритому приміщенні деревообробного цеху загальною площею 14 256 м² при різних пожежних ситуаціях показали, що залежно від місця виникнення пожежі вся площа цеху може бути охоплена пожежею в межах 15...33,4 хв. У межах цього часу неможливо ліквідувати пожежу силами пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС. Тому рекомендується на деревообробних підприємствах організовувати добровільні пожежно-рятувальні служби, які зможуть у разі виникнення пожежі розпочати її ліквідацію до приїзду пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС.

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

5. Вперше розроблено математичні моделі, алгоритми і програми для ПЕОМ з метою оптимізації кількості сил і засобів пожежогасіння у

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

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

6. Удосконалена методологія для встановлення класу вогнестійкості кроквяних ферм для скатних покрівель за ознакою втрати несучої здатності дає змогу значно зменшити витрати на її визначення. Вперше встановлено, що вогнестійкість кроквяних ферм скатних покрівель залізобетонної конструкції деревообробних цехів з шириною прольоту 18 000 мм, які найчастіше використовують у будівельній практиці, за ознакою втрати несучої здатності належить до класу вогнестійкості R90. Цей клас вогнестійкості кроквяних ферм скатних покрівель залізобетонної конструкції повинен бути головною підставою для пожежно-рятувальних підрозділів під час визначення часу ліквідації пожежі.

7. Встановлено методи подачі води для її ефективного використання в процесі захисту від нагрівання штабелів, які не горять і знаходяться перед

фронтом пожежі. Оптимальним між віссю пожежного ствола і боковою поверхнею штабеля є кут не більше 20° .

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

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

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

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

витрати пожежно-рятувальних підрозділів на ліквідацію пожежі. Застосування програмного комплексу під час ліквідації пожежі на деревообробних підприємствах дозволяє зменшити збитки майже у 6 разів, якщо порівняти зі збитками від пожеж, ліквідацією яких керували на підставі нормативних документів. Цей ефект досягається завдяки автоматизованому отриманню високоточних прогнозів динаміки пожежі і параметрів організаційно-технічних рішень для введення сил і засобів в осередок пожежі. Розроблені в дисертаційній роботі методи і рекомендації після повного впровадження у практичну діяльність пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України дозволять отримати економічний ефект в сумі 5,7 млн грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е., Туркин И. Б. Нагрев поверхностного слоя нефтепродукта в резервуаре от факела горящего резервуара. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков: Фолио, 2004. Вып. 16. С. 3–7.
2. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами. Харьков: АГЗУ, 2006. 251 с.
3. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. Алгоритм оптимального расположения сил и средств для тушения пожара в резервуарном парке. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харьков: Фолио, 2006. Вип. 3. С. 26–32.
4. Автоматичні системи пожежогасіння. URL: http://ua.perun.ua/accordions/view/sistemi_pozhezhogasnnya.
5. Автоматичні системи пожежогасіння. URL: <http://remontvdome.com.ua/avtomatichni-sistemi-pozhezhogasinnya>.
6. Аналіз ризику стану екологічної безпеки України. URL: <http://www.ukrajinciberlinu.wordpress.com/2009/11/08>.
7. Андрейцев В. І. Концепція Закону України про екологічну (природно-техногенну) безпеку. *Матеріали семінару з питань законодавства по екологічній безпеці*. Київ: НАН України, 1998. С. 18–24.
8. Андрейцев В. І. Право екологічної безпеки. Київ: Знання-Прес, 2002. 332 с.
9. Андрусейко О. Б., Грицюк Ю. І. Склади зберігання пиломатеріалів: особливості запобігання виникненню пожежі. *Пожежна безпека*. 2013. № 23. С. 7–13.
10. Аникиев В. В., Захарова П. В. Интегральный критерий экологической безопасности. *Геоинформатика*. 2002. № 1. С. 18–24.
11. Артемьев Н. С. Исследование распространения пожара на лесоскладах за счет переноса высокотемпературных частиц: дис. ... канд. техн. наук. Москва: ВИПТШ, 1981.

12. Артемьев Н. С. Исследование распространения пожаров на лесоскладах за счет переноса высокотемпературных частиц: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва: ВИПТШ, 1981. 18 с.
13. Асатурян В. И. Теория планирования эксперимента. Москва: Радио и связь, 1983. 248 с.
14. Астапенко В. М., Кошмаров Ю. А., Молчадский И. С., Шевляков А. Н. Термогазодинамика пожаров в помещениях. Москва: Стройиздат, 1986. 370 с.
15. Астахова И. Ф., Молчадский И. С. Развитие полевого моделирования пожара в помещении и теории огнестойкости в России. *Моделирование пожаров и взрывов*. Москва: Пожнаука, 2000. С. 89–105.
16. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 2015 рік. URL: http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2015/2/17/AD_01_15.pdf.
17. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 2016 рік. URL: 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. Харків: УЦЗ України, 2006. 36 с.
19. Бегун В. В., Наumenко І. М. Безпека життєдіяльності. Київ, 2004. 328 с.
20. Безродный И. Ф., Меркулов В. А., Гилетич А. Н. Современные технологии пожаротушения. *Юбилейный сборник трудов ВНИИПО*. Москва: ВНИИПО МВД России, 1997. С. 335–339.
21. Белов И. В. Транспортная модель распространения газообразных примесей в атмосфере города. *Математическое моделирование*. 2000. Т. 12. № 11. С. 38–46.
22. Беликов А. С., Крикунов Г. Н., Залуин В. Ф. Безопасность жизнедеятельности. Днепропетровск: Пороги, 1992. 412 с.
23. Беликов А. С., Крикунов Г. Н., Залуин В. Ф. Безопасность жизнедеятельности. Днепропетровск: УКО ИМА пресс, 1995. 195 с.

24. Беликов А. С., Шаломов В. А., Рагимов С. Ю., Чаплыгин А. С. Контроль высокотемпературного излучения на рабочих местах. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2015. Вып. 80. С. 49–55.

25. Биченок М. М. Автоматизація управління захистом регіону у надзвичайних ситуаціях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ: Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова, 1998. 38 с.

26. Большеротов А. Л., Большеротова Л. В. Международные системы оценки экологической безопасности строительства. *Жилищное строительство*. 2012. № 10. С. 42–45.

27. Большеротов А. Л., Большеротова Л. В. Существующие методы оценки загрязнения окружающей среды и воздействия на нее. *Жилищное строительство*. 2012. № 11. С. 37–41.

28. Большеротов А. Л., Большеротова Л. В. Стратегия обеспечения экологической безопасности строительства. *Жилищное строительство*. Ч. 1: Современное состояние. 2012. № 12. С. 39–41.

29. Большеротов А. Л. Взаимосвязь развития строительства и экологических проблем. *Жилищное строительство*. 2012. № 6. С. 86–88.

30. Бондарев В. Ф., Бороздин С. А., Зычков Э. А. Методические основы расчета сил и средств для проведения спасательных работ при пожаре. *Матер. XVI науч.-практ. конф. «Крупные пожары: предупреждение и тушение»*. Москва: ВНИИПО, 2001. Ч. 2. С. 252–254.

31. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В. Моделирование тушения пожаров в городах. *Моделирование пожаров и взрывов*. Москва: Пожнаука, 2000. С. 447–476.

32. Брушлинский Н. Н., Кафилов В. В., Козлачков В. И. и др. Системный анализ и проблемы пожарной безопасности народного хозяйства. Москва: Стройиздат, 1988. 413 с.

33. Брушлинский Н. Н., Гришин А. Ф., Семенов В. Л. ЭВМ и АСУ в пожарной охране. *Итоги науки и техники*. Москва, 1979. Т. 3. 240 с.

34. Брушлинский Н. Н., Микеев А. К., Бозуков Г. С. и др. Совершенствование организации и управления пожарной охраной / под ред. Н. Н. Брушлинского. Москва: Стройиздат, 1986. 152 с.

35. Брушлинский Н. Н. Применение экономико-математических методов для решения организационно-управленческих задач пожарной службы. *Вопросы экономики в пожарной охране*. Москва: ВНИИПО МВД СССР, 1972. С. 114–122.

36. Брушлинский Н. Н., Соболев Н. Н. Математическая модель расчета среднего радиуса выезда оперативных отделений пожарной охраны по вызовам. *Пожарная техника и пожаротушение на объектах народного хозяйства*. Москва: ВИПТШ МВД СССР, 1986. С. 58–66.

37. Бут В. П., Куціший Л. Б., Болібрух Б. В. Практичний посібник з пожежної тактики. Львів: СПОЛОМ, 2003. 122 с.

38. Васильєв М. И., Мовчан І. О., Коваль О. М. Зменшення екологічного ризику за рахунок оптимізації проектів системи пожежогасіння на складах лісоматеріалів. *Науковий вісник НГУ*. 2014. № 5. С. 106–113.

39. Валендик Э. Н. Ветер и лесной пожар. Москва: Наука, 1968. 118 с.

40. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: 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. Львів: ДУ БЖД, 2011. 20 с.

42. Гасіння пожеж на об'єктах зберігання і переробки деревини. URL: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=78447>.

43. Гасіння пожеж на складах лісоматеріалів. URL: <http://asyan.org/potrf/%D0%91%>.

44. Гулида Э. Н., Коваль О. М. Оптимизация размеров пожарных отсеков цехов деревообрабатывающих предприятий. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. 2014. № 1 (35). С. 55–63.

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

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

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

48. Гуліда Е. М., Коваль О. М. Моделювання тактики локалізації та гасіння пожежі в закритих приміщеннях деревообробних підприємств. *Пожарная безопасность: теория и практика*. 2015. № 19. С. 25–36.

49. Гуліда Е. М., Ренкас А. А. Вплив пожеж на екологічну безпеку навколишнього середовища. *Науковий вісник НГУ*. 2014. № 5. С. 91–100.

50. Гуліда Е. М., Карабин О. О., Смотров О. О. Математична модель розповсюдження лісової пожежі за рахунок теплового випромінювання. *Науковий збірник 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. *Збірник наукових праць «Пожарная безопасность»*. 2014. № 2. С. 129–136.

52. Гуліда Е. М., Меньшикова О. В. Метод статистичного моделювання пожежі в приміщенні. *Проблемы пожарной безопасности*. Харків: НУГЗУ, 2010. Вип. 28. С. 65–73.

53. Гуліда Е. М., Мовчан І. О. Надійність технології гасіння пожежі на машинобудівних підприємствах. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2004. № 2 (10). С. 42–48.

54. Гуліда Е. М., Мовчан І. О., Дзюба Л. Ф. Визначення показників надійності пожежної техніки методом статистичного моделювання. *Збірник наукових праць «Пожарная безопасность»*. 2006. № 8. С. 116–121.

55. Гуліда Е. М. Зменшення тривалості вільного розвитку пожежі на основі оптимізації шляху слідування пожежних до місця її виникнення. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека»*. 2013. № 23. С. 64–70.

56. Гуліда Е. М., Коваль О. М. Надійність пожежної техніки для локалізації та гасіння пожеж на деревообробних підприємствах. *12-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків*. Львів: Львівська політехніка, 2015. С. 144–146.

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

58. Гуліда Е. М., Коваль О. М. Определение оптимальных размеров пожарных отсеков цехов для деревообрабатывающих предприятий. *VI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций»*. Кокшетау: КТИ МЧС РК, 2015. С. 82–85.

58. Гулида Э. Н. Управление надежностью цилиндрических зубчатых колес. Львов: Вища школа, 1983. 136 с.

60. Гуліда Е. М. Прогнозування величини оптичної густини диму при пожежі в приміщенні. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека»*. Львів: ЛДУ БЖД, 2011. № 18. С. 65–70.

61. Гуліда Е. М., Заплава В. І., Крутінь Д. О. Прогнозування пожеж на підставі статистики їх виникнення. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків: УЦЗ України, 2007. Вип. 22. С. 70–76.

62. Гуліда Е. М., Мовчан І. О., Кіт Т. М. Методика визначення соціального пожежного ризику в приміщеннях навчальних закладів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Вип. 24.11. С. 139–149.

63. Гуліда Е. М., Мовчан І. О., Войтович Д. П. Оптимізація технології пожежогасіння на машинобудівному підприємстві. *Пожежна безпека*. 2004. № 4. С. 92–98.

64. Гуліда Е. М., Мовчан І. О. Вибір оптимального варіанту технологічного процесу гасіння пожежі на машинобудівних підприємствах. *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., Мовчан І. О. Надійність технології гасіння пожежі на машинобудівних підприємствах. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2004. № 2 (10). С. 42–48.

66. Горіння деревини. URL: <http://kyrator.com.ua/index.php>.

67. ГОСТ 2292-88. Лесоматериалы круглые. Москва, 2003. 9 с.

68. Гусев В. Г., Корчунова И. Ю. О методе расчета скорости распространения лесного низового пожара. *Лесные пожары и борьба с ними*. Ленинград: ВИНТИ, 1986. С. 31–50.

69. Гуцуляк В. Ю., Коваль О. М., Лоїк В. Б., Вовк С. Я. Експериментальні дослідження вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, покритих наповненими силіційорганічними сполуками. *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: дис. ... канд. техн. наук. Москва: ВИПТШ, 1975.

71. ДБН В.2.5-56:2010 Системи протипожежного захисту. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ, 2014. 185 с.

72. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ, 2014. 177 с.

73. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

74. Девлишев П. П. Исследование кинетики пожара на моделях. *Пожарная наука и техника*. Москва: ВНИИПО, 1977. С. 178–208.

75. Демидов П. Г., Шандыба В. А., Щеглов П. П. Горение и свойства горючих веществ. Москва: Химия, 1981. 272 с.
76. Пожежна безпека. Продукція протипожежного призначення. Державні стандарти України. Київ: Пожінформтехніка, 2000. 640 с.
77. Дзюба Л. Ф., Зима Ю. В., Лютий Є. М. Основи надійності машин. Львів: Логос, 2003. 204 с.
78. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. Москва: Мир, 1984. 318 с.
79. Добровольський В. В. Екологічна безпека і ризик: деякі понятійно-категоріальні уточнення. *Екологічна безпека*. 2011. № 1. С. 17–20.
80. Дорогунцов С., Бутрим О. Ризик надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. *Економіка України*. 2001. № 4. С. 68–73.
81. Доррер Г. А., Курбатский Н. П. Математические модели лесных пожаров: основные понятия, классификация, требования. *Прогнозирование лесных пожаров*. Красноярск, 1978. С. 5–26.
82. Доррер Г. А. Математические модели динамики лесных пожаров. Москва: Лесная промышленность, 1979. 161 с.
83. Драздейл Д. Введение в динамику пожаров. Москва: Стройиздат, 1988. 340 с.
84. ДСТУ Б В.1.1-18:2007. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги. Київ: Мінрегіонбуд України, 2007. 13 с.
85. ДСТУ 2302-93 Батареї акумуляторні свинцеві стартерні. Приймання до ремонту і видача. Київ: Держстандарт України, 2000. 18 с.
86. ДСТУ 3760:2006. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 28 с.
87. ДСТУ Б.В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2006. 14 с.
88. Єлагін Г. І., Шкарабура М. Г., Кришталь М. А., Тищенко О. М. Основи теорії розвитку і припинення горіння. Черкаси: ЧІПБ, 2001. 448 с.

89. Заходи щодо попередження розповсюдження пожежі.
URL: <http://studentbooks.com.ua/content/view/1344/76/1/5/>.
90. Зверев В. Г. Математическое моделирование аэродинамики и тепломассопереноса при распространении вершинных лесных пожаров: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 1985. 24 с.
91. Иванов И. А. Определение скорости распространения пламени по штабелям лесобирж. *Пожарная профилактика*. Москва: Стройиздат, 1977. Вып. 11. С. 84–92.
92. Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. Москва: Стройиздат, 1987. 288 с.
93. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва: Энергия, 1975. 488 с.
94. Исследование пожаров на моделях / под ред. В. Ф. Комова. Москва: ВНИИПО МВД СССР, 1969. 152 с.
95. Калиновский А. Я., Созник А. П. Модель распространения ландшафтного пожара с учетом изменения влажности горючего материала. *Науковий вісник будівництва*. 2005. Вип. 31. С. 291–295.
96. Калиновський А. Я., Созник А. П. Модель поширення ландшафтної пожежі з урахуванням флуктуацій вітру і вологості пального матеріалу. *Пожежна безпека*. 2005. Вип. 6. С. 25–28.
97. Каталог деревообробних підприємств України. URL: <http://www.rada.com.ua/Ukr/catalog>.
98. Кимстач И. Ф. Организация тушения пожаров в городах и населенных пунктах. Москва: Стройиздат, 1997. 142 с.
99. Класифікація твердих горючих матеріалів (ТГМ). URL: <http://nuczu.edu.ua/material/avtomat/ukr/lessons/1/6.html>.
100. Климась Р. Статистика пожеж на деревообробних підприємствах за 2012–2013 роки. Київ: УкрНДІЦЗ, 2013. 2 с.
101. Климась Р. Статистика пожеж на деревообробних підприємствах за 2014 рік. Київ: УкрНДІЦЗ, 2014. 1 с.

102. Климась Р., Одинець А. Аналіз стану з пожежами в Україні за 2014 рік. *Пожежна та техногенна безпека*. 2015. № 2 (17). С. 23–26.
103. Климась Р. Статистика пожеж на деревообробних підприємствах за 2011 і 2012 роки. Київ: УкрНДІЦЗ, 2013. 5 с.
104. Коваль О. М. Процес розвитку та поширення пожежі в приміщеннях будівель деревообробних підприємств. *Пожежна безпека*. 2013. № 22. С. 121–127.
105. Коваль О. М. Моделювання розвитку та поширення пожежі на відкритих складах пиломатеріалів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. Вип. 23.10. С. 303–313.
106. Коваль О. М. Швидкість розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2013. № 13. С. 123–131.
107. Коваль О. М. Моделювання тактики локалізації та гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2015. № 26. С. 71–85.
108. Коваль А. М. Скорость распространения фронта пожара на открытых складах круглых лесоматериалов штабельного хранения. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. 2015. № 1. С. 66–78.
109. Коваль О. М., Гуліда Е. М. Математична модель вибору оптимальної тактики гасіння пожеж в приміщеннях цехів деревообробних підприємств. *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. *Науковий вісник: НЛТУ України*. 2015. Вип. 25.4. С. 345–352.
111. Коваль О. М., Гуліда Е. М. Математична модель вибору оптимальної тактики гасіння пожеж на складах лісоматеріалів деревообробних підприємств. *Науковий вісник: НЛТУ України*. 2015. Вип. 25.6. С. 272–287.

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

113. Коваль О. М. Оптимізація кількості протипожежних засобів в приміщеннях цехів деревообробних підприємств. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2015. № 27. С. 78–86.

114. Коваль О. М. Тривалість оперативного розгортання підрозділів ДСНС для ліквідації пожеж на деревообробних підприємствах. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2016. № 28 С. 78–87.

115. Коваль О. М. Експериментальне дослідження тривалості локалізації і гасіння пожеж на відкритих складах пиломатеріалів штабельного зберігання. *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». Київ: ДСІВ України. Дата реєстрації 28.07.2015.

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». Київ: ДСІВ України. Дата реєстрації 15.09.2015.

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». Київ: ДСІВ України. Дата реєстрації 11.01.2016.

119. Коваль О. М. Обоснование применения пожарных отсеков в цехах деревообрабатывающих предприятий. *IV Міжнародна науково-практична конференція «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. *Міжнародна науково-практична конференція*

«Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури». Київ: УкрНДІЦЗ, 2015. С. 72–74.

121. Коваль О. М. Визначення необхідної кількості протипожежних засобів в приміщеннях цехів деревообробних підприємств. *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. *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. *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. *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. *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. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Забезпечення пожежної та техногенної безпеки»*. Київ: УкрНДІЦЗ, 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». Київ: ДСІВ України. Дата реєстрації 28.10.2016.

128. Коваль О. М. Свідectво 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». Київ: ДСІВ України. Дата реєстрації 28.10.2016.

129. Коваль О. М. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 68450 «Комп'ютерна програма для визначення кількості всіх необхідних засобів протипожежного захисту об'єкта». Київ: ДСІВ України. Дата реєстрації 20.11.2016.

130. Когут М. С. Механоскладальні цехи та дільниці у машинобудуванні. Львів: Львівська політехніка, 2000. 352 с.

131. Комяк В. А., Откидач Н. Я., Шило С. А. Геометрическое моделирование в прогнозах динамики развития лесного пожара. *Проблемы пожарной безопасности*. 1999. Вып. 5. С. 124–127.

132. Комяк В. А., Покровский Р. Л. Геометрическое моделирование в прогнозах динамики развития лесного пожара для неоднородного слоя. *Проблемы пожарной безопасности*. 2001. С. 77–80.

133. Копылов Н. П., Гроздов Г. М. О влиянии ветра на величину тепловых потоков от пламени открытого пожара. *Пожарная профилактика*. Москва: ВНИИПО. 1980. Вып. 16. С. 68–73.

134. Копылов Н. П. Моделирование пожаров на складах лесоматериалов. *Моделирование пожаров и взрывов*. Москва: Пожнаука, 2000. С. 189–197.

135. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. Москва: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.

136. Кудин А. И., Пермяков В. И. Обзор критериев принятия решения для целей создания оперативного плана тушения пожаров в резервуарных парках. Харьков: ХГТУСА, 1996. 73 с.

137. Кудин А. И., Пермяков В. И. Организация базы знаний для экспертной системы принятия решения при тушении пожаров с нефтепродуктами. *Проблеми пожежної безпеки*. Киев: МВС України, 1995. С. 244–245.

138. Кудін А. І. Розроблення експертної системи прийняття рішень при організації гасіння пожеж: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків: ХІПБ, 1997. 18 с.

139. Курбатский О. М. Результаты исследования тушения пожаров лесобирж. *Вопросы пожаротушения и пожарной профилактики*. Москва: ВНИИПО, 1959. С. 41–52.

140. Курбатский О. М., Петров И. И. Тушение пожаров на складах лесопиломатериалов. *Успехи пожарной науки и техники*. Москва: Стройиздат, 1967. С. 60–66.

141. Кимстач И. Ф., Девлишев П. П., Евтюшкин Н. М. Пожарная тактика. Москва: Стройиздат, 1984. 590 с.

142. Кимстач И. Ф. Организация тушения пожаров в городах и населенных пунктах. Москва: Стройиздат, 1997. 142 с.

143. Корнякова Н. О. Нормативно-правове регулювання поведження з відходами за законодавством України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2004. Вип. 59. С. 170–173.

144. Корнякова Н. О. Юридичне визначення поняття та видів відходів за законодавством України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2004. Вип. 58. С. 123–126.

145. Коробкин В. И., Передельский Л. В. Экология и охрана окружающей среды. Ростов-на-Дону: Кнорус, 2014. 336 с.

146. Кругляк в Україні. Купити. Ціна. URL: <http://woodex.ua/ru/trade/list/c28>.

147. Копиленко М. Э. Моделирование реальных пожаров в помещениях: проблемы и решения. Промышленная теплотехника. Киев, 2001. Т. 23, № 1–2. С. 16–20.

148. Копиленко М. Э., Круковский П. Г., Картавова Е. С. Моделирование огнестойкости элементов строительных конструкций в условиях реального пожара. *Промышленная теплотехника*. Киев, 1999. Т. 21, № 4–5. С. 16–21.

149. Крайнюк О. І. Підходи до визначення місць дислокації та площі обслуговування підрозділів місцевої пожежної охорони. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2008. № 2 (18). С. 180–185.

150. Кіндрацький Б. І., Сулим Г. Т. Рациональное проектирования машинобудівних конструкцій. Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2003. 279 с.

151. Лыков А. В. Тепломассообмен. Москва: 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). Москва: МЧС РФ, 2009. 10 с.

153. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. Москва: НИИЖБ, 2000. 92 с.

154. Мовчан І. О., Гуліда Е. М., Войтович Д. П. Визначення прогнозованого часу гасіння пожежі на промислових підприємствах. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків: УЦЗУ, 2008. Вип. 21. С. 241–247.

155. Мовчан І. О. Забезпечення надійності технології гасіння пожежі на машинобудівному підприємстві: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків: УЦЗУ, 2007. 20 с.

156. Мовчан І. О., Гуліда Е. М. Визначення ризику евакуації людей із будівель та споруд у випадку пожежі з урахуванням її критичного часу. *Вісник ЛДУ БЖД*. Львів: ЛДУ БЖД, 2012. № 6. С. 157–161.

157. Мовчан І. О., Васильєв М. І. Вибір критеріїв для прийняття рішень в системі пожежогасіння. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. Львів: ЛДУ БЖД, 2013. № 8. С. 146–154.

158. Мовчан І. О., Васильєв М. І., Гуліда Е. М. Оптимізаційна модель протипожежного захисту міста для допустимого значення пожежного ризику. *Пожежна безпека*. Львів: ЛДУ БЖД, 2013. № 22. С. 65–71.

159. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений / пер. с нем. Москва: Мир, 1990. 208 с.
160. Надежность и эффективность в технике: в 10 т. / под ред. И. В. Апполонова. Москва: Машиностроение, 1989. Т. 7. 280 с.
161. Напрямки протидимного захисту і його реалізація. URL: <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. Москва: Стройиздат, 1987. 376 с.
163. Нефедов Н. А., Белан Н. А. Имитационная модель оперативно-тактической деятельности пожарной охраны крупнейших городов. *Рукоп. депон. в ГНТБ Украины*. 1997. № 242. 21 с.
164. Никонов С. А., Боровикова Т. Б., Шишков М. В. Исследование структуры и обоснование компонентов 1-ой очереди САПР «Пожарная безопасность». *Системные исследования проблем пожарной безопасности*. Москва: ВНИИПО МВД РСФСР, 1990. С. 94–101.
165. Носовський Т. А., Мацюк Р. І., Маслій В. В. Технологія лісопильно-деревообробних виробництв. Київ: НМК ВО, 1993. 196 с.
166. Нормативи по пожежно-стройовій підготовці. Київ: УДПО МВС України, 1995. 14 с.
167. Об'ємно-планувальні рішення з забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд. URL: <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. Київ: Департамент ЦЗ МНС України, 2005. 31 с.
169. Озарків І. М., Сомар Г. В., Соколовський І. А. та ін. Основи мокрого очищення газів. *Науковий вісник: НЛТУ України*. 2016. Вип. 26.4. С. 230–233.

170. Озарків І. М., Дадак Ю. Р., Дадак Р. М. Фізичні закономірності мокрого вловлювання газопилових потоків. *Науковий вісник: НЛТУ України*. 2014. Вип. 24.10. С. 103–106.
171. Озарків І. М., Мисак Й. С., Кірик М. П. та ін. Основи техноекології. Львів: НВФ «Українські технології», 2009. 336 с.
172. Озарків І. М., Сомар Г. В., Соколовський І. А., Дадак Ю. Р. Закономірності переміщення подрібнених матеріалів у циклонах. *Науковий вісник: НЛТУ України*. Львів: НЛТУ України. 2013. С. 121–126.
173. Оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей. URL: <http://sota.org.ua/ua/systemy/soundfire>.
174. Определение категории помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности (ОНТП 24–86). URL: <http://www.dnaop.com/html>.
175. Оцінка і напрямки зменшення загроз біорізноманіттю України. Київ: Хімджест, 2003. 399 с.
176. Пархоменко Р. В., Болібрux Б. В., Чалий Д. О. Пожежна тактика. 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. ст. канд. техн. наук: спец. 21.06.02. Львів: ДУ БЖД, 2012. 20 с.
178. Перелік внесених змін до управління системами протипожежного захисту. URL: www.usptb.org/upload/.../fls/1349856892.docx.
179. Пермяков В. И., Кудин А. И. Перспективы разработки и применения экспертных систем при тушении пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков: МВД Украины, 1993. С. 293–296.
180. Пляскин И. И. Оптимизация технических решений в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1982. 176 с.
181. Повзик Я. С., Ключ П. П., Матвейкин А. М. Пожарная тактика. Москва: Стройиздат, 1990. 335с.
182. Пожежа на території ТОВ «Свіспан-Лімітед» в м. Костопіль. URL: <http://www.youtube.com/watch>.

183. Пожежа на деревообробному підприємстві «Клен». URL: <http://zakarpattyia.net.ua/News/>.

184. Покровский Р. Л. Раннее обнаружение очагов ландшафтных пожаров и прогноз динамики их распространения: автореф. дис. ... 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. Москва, 2008. 134 с.

186. Посацький С. Л. Опір матеріалів. Львів: Вид-цтво Львівського ун-та, 1973. 403 с.

187. Повзик Я. С., Артемов Н. С., Торебнев В. П. Аналитическое определение времени боевого развертывания пожарных подразделений. Пожарная техника и пожаротушение на объектах народного хозяйства. Москва: ВПНТШ МВД СССР, 1986. С. 7–9.

188. Призначення противодимного захисту. URL: <http://nuczu.edu.ua/-material/avtomat/ukr/lessons/14/1.html>.

189. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях. Москва: МЧС РФ, ВНИИПО, 2001. 21 с.

190. Проблеми проектування систем інженерного забезпечення – безпека життєдіяльності. URL: <http://8ref.com/8/referat>.

191. Проект технологічного процесу лісосклад. URL: <http://bukvar.su/promyshlennost-proizvodstvo/89123>.

192. Проект ДСТУ-Н П Б В.2.6-XX: 20XX. 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». *Пожаровзрывобезопасность*. 2009. № 7. С. 25–26.

194. Пронин Д. Г. Обоснование размеров пожарных отсеков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва: ФГУ ВНИИПО, 2011. 21 с.

195. Проников А. С. Надежность машин. Москва: Машиностроение 1978. 592 с.
196. Протипожежні перешкоди та захист отворів у них. URL: <http://westudents.com.ua/glavy/3563-463-protipojejn-pereshkodi>.
197. Пузач С. В., Лебедченко О. С., Смагин А. В. Новые представления об очередности наступления опасных факторов пожара во время эвакуации людей из здания. *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. Москва: 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. Москва: ВНИИПО МВД России, 1995. 76 с.
201. Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций. Москва: НИИЖБ, 1986. 40 с.
202. Рекомендации по обследованию зданий и сооружений, поврежденных пожаром. Москва: Стройиздат, 1987. 75 с.
203. Ренкас А. А. Методи забезпечення вогнестійкості залізобетонних плит перекриття житлових будівель з урахуванням умов реальної пожежі: дис. ... канд. техн. наук. Львів: ЛДУ БЖД, 2014. 20 с.
204. Ренкас А. А., Гулида Э. Н. Стойкость железобетонных плит перекрытия после неравномерного прогрева во время пожара. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. Минск: НИИПБ и проблем чрезвычайных ситуаций, 2013. № 2(34). С. 40–46.
205. Ренкас А. А., Гулида Е. М. Врахування реального розподілу температури при пожежі та його вплив на залишкову міцність залізобетонних плит перекриття. *Пожежна безпека*. Львів: ЛДУ БЖД, 2013. № 23. С. 131–138.

206. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З. Надежность машин. Москва: Высшая школа, 1988. 238 с.
207. Романычева Н. Н., Минаев С. Н., Августинович О. В. К оценке деятельности структурных звеньев пожарной охраны. *Вопросы экономики в пожарной охране*. ВНИИПО МВД СССР, 1977. Вып. 7. С. 61–66.
208. Рыбальский Н. Г., Малярова М. А., Горбатовский В. В., Рыбальская В. Ф. Экология и безопасность. Т. 1: Безопасность человека. Москва: ВНИИПИ, 2006. Ч. 1. 319 с.
209. Рыжов А. М. Дифференциальный (полевой, CFD) метод моделирования пожаров. *Моделирование пожаров и взрывов*. Москва: Пожнаука, 2000. С. 25–88.
210. Савченко О. В., Кіреєв О. О., Шаршанов А. Я. Модель гасіння пожежі постійної площі з урахуванням часу повторного займання, кількісного та якісного складу горючого завантаження. *Проблемы пожарной безопасности*. Харків: УГЗУ, 2007. Вип. 22. С. 161–165.
211. Садковой В. П. Экспрес-решение прямой и обратной задач пожаротушения. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков: УГЗУ, 2007. Вип. 22. С. 166–169.
212. Самошин Д. А. Расчет пожарных рисков для общественных, жилых и административных зданий. URL: <http://www.akademygps.ru>.
213. Брушлинский Н. Н., Кафидов В. В., Коргачков В. И. и др. Системный анализ и проблемы пожарной безопасности народного хозяйства / под. ред. Н. Н. Брушлинского. Москва: Стройиздат, 1988. – 413с.
214. Системи оповіщення та управління евакуацією. URL: <http://www.vellez.ua/uk/souerus.htm>.
215. Склад круглих лісоматеріалів. URL: <http://sheplis.com.ua/fotogalereja/fotogalereja-2015-roku.html>.
216. Склад пиломатеріалів. URL: <http://ua.112.ua/avarii-np/u-kharkovi-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. Москва: Академия ГПС МЧС России, 2008. 24 с.

218. Снегирев А. Ю., Танклевский Л. Т. Численное моделирование турбулентной конвекции в помещении при наличии очага пожара. *Теплофизика высоких температур*. 1998. Т. 36. № 6. С. 973–983.

219. Снегирев А. Ю., Махвиладзе Г. М., Робертс Дж. Численное моделирование диффузионного турбулентного горения при различных режимах пожара в помещении. *Труды II Российской национальной конференции по теплообмену*. Москва: МЭИ, 1998. Т. 3. С. 273–276.

220. СНиП 21-03-2003. Склады лесных материалов. Противопожарные нормы РФ. Москва: Пожарный Центр, 2003. 18 с.

221. СП 2.13130.2012 Свод правил системы противопожарной защиты «Обеспечение огнестойкости объектов защиты». Москва: МЧС России, 2012. 46 с.

222. Созник А. П. Геометрическая модель движения кромки низового лесного пожара. *Проблемы пожарной безопасности*. 2002. Вып. 11. С. 188–191.

223. Солонин И. С. Математическая статистика в технологий машиностроения. Москва: МАШГИЗ, 1960. 176 с.

224. Сповідувач пожежний ручний. URL: <http://www.tiras.ua/uk/product/spr-t-ras>.

225. Страхов В. Л. Оптимальное проектирование огнестойких строительных конструкций. *Моделирование пожаров и взрывов*. Москва: Пожнаука, 2000. С. 365–446.

226. Тарахно О. В., Шаршанов А. Я. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі. Харків, 2004. 252 с.

227. Туркин Б. Ф., Денисов Г. В. Автоматизированная система управления пожарной охраной крупного административного центра. *Пожарная профилактика*. Москва: ВНИИПО, 1980. №16. С. 144–153.

228. Умови виникнення і основні характеристики процесу горіння. URL: <http://lektsii.net/2-56638.html>.

229. Уніфікована типова секція (UTC). URL: <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-181.../316.ht>.

230. Условия хранения пиломатериалов. URL: <http://brigadeer.ru/stadii-proizvodstva/xranenie-drevesiny.html>.

231. Федоров А. И., Безуглов О. Е. Оценка максимальной температуры в помещении на начальной стадии пожара. *Проблемы пожарной безопасности*. Киев, 2010. Вып. 27. С. 221–225.

232. Федоров В. С., Левитский В. Е., Молчадский И. С., Александров А. В. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций. Москва: АСВ, 2009. 408 с.

233. Фомин С. Л. Методика численного определения температурных полей в железобетонных конструкциях при пожаре. *Республиканский межведомственный сб. «Коммунальное хозяйство городов»*. Киев: Техника, 1997. Вып. 9. С. 57–58.

234. Ференц О. Б., Максимів В. М. Технологія столярних виробів. Львів: НЛТУ України, 2011. 400 с.

235. Хлобыстов Е. Экологическая безопасность и основы определения риска техногенных катастроф. *Экономика Украины*. 2000. № 6. С. 38–46.

236. Холщевников В. В. Проблемы оценки безопасности людей при пожаре в уникальных зданиях и сооружениях. *Пожаровзрывобезопасность*. 2003. № 4. С. 21–27.

237. Христич В. В., Дерев'янюк О. А., Бондаренко С. М., Антошкін О. А. Системи пожежної та охоронної сигналізації. Харків: Академія ПБ України, 2005. 87 с.

238. Цапко Ю. В. Визначення ефективності вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів. *Зб. наук. праць*. Львів: ЛПІБ, 2005. № 7. С. 132–134.

239. Чебан Т. М. Сучасний стан та перспективи механізму правової охорони рекреаційних територій України. *Актуальні проблеми вдосконалення чинного законодавства України*. 2010. Вип. 23. С. 177–183.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/apvchzu_2010_23_27.

240. Чернуха А. М., Поляк Т. Ю. Визначення усередненого часу вільного розвитку пожежі у населених пунктах. *Проблеми пожежарної безпеки*. Харків: УЦЗУ, 2007. Вип. 21. С. 297–300.

241. Шараварников А. С., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шараварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. Москва: Калан, 2002. 448 с.

242. Шевчук А. П., Иванов В. А., Косачев А. А. Проблемы количественной оценки пожарного риска. *Пожаровзрывобезопасность*. 1994. №1. С. 42–48.

243. Шеннон Р. Имитационное моделирование – искусство и наука. Москва: Мир, 1978. 418 с.

244. Шерешевский И. А. Конструирование промышленных зданий и сооружений. Москва: 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., Кузнецов Ю. С. Техническая диагностика пожарных автомобилей. Москва: Стройиздат, 1989. 289 с.

248. Як виміряти обсяг лісоматеріалу? URL: <http://denisa.com.ua/yak-vymiryaty-obsyah-lisomaterialu/>.

249. Ярчак В. Про екологічний ризик джерел підвищеної екологічної небезпеки. *Вісник Львівського університету*. 2009. Вип. 48. С. 209–215.

250. Blanchard Ben S. Cost effectiveness, integrated logistics support and maintainability. *IEEE transaction ob reliability*. 1967. №3. P. 117–126.

251. Shebeko Yu. N., Tsarichenko S. G., Korolchenko A. Ya. et al. Burning velocities and flammability limits of gaseous mixtures at elevated temperatures and pressures. *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. Vol, 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 / NATO Advis. Group. Aerosp Res. and Dev.-Seattle Washington, 1989. 22–26 May. 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. Xiaojun Chen, Lizhong Yang, Zhihua Deng, Weicheng Fan. A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a fire room. *Fire Safety Journal*. 2005. № 40. P. 267–281. URL: <http://www.elsevier.com/locate/firesaf>.

256. Cooper L. Y., Rockett J. A., Mitler H. E., Stroup D. W. A program for the development of a benchmark compartment fire model computer code. *Math. Model. Fires*. Philadelphia (Pa), 1988. P. 116–127.

257. Cox G., Markatos N. C. Hydrodynamics and heat transfer in enclosures containing a here source. *Physico-cemical Hydrodynamics*. 1984. № 5. P. 53.

258. Cox G., Kumar S., Markatos N. S. Some field model validation studies. Proceedings of the First International Symposium on Fire Safety Science. Hemisphere, 1986. P. 159.

259. Cox G., Kumar S. Field Modeling of Fire in Forced ventilated Enclosures. *Comb. Sci. and Tech*. 1987. Vol. 52. P. 7–23.

260. Computational modeling for fires. (2016). URL: <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. URL: <http://www.nafems.org/>.
267. Fire Fighting Tactics & Decision Making In Lightweight Construction. 2016. URL: http://www.fvfpd.com/.../FF_Tactics__Decisio.
268. Forney G. P., Moss W. F. Analyzing and Exploring Numerical Characteristics of Zone Fire Models. *Fire Science and Technology*. 1994. Vol. 14. № 1, 2. P. 49–59.
269. Galea E. R. A general approach to validating evacuation models with an application to v. *Jornal of Fire Sciences*. 1998. Vol. 16. № 6. P. 414–436.
270. Goderedson J. Computer technologies an aid to fire brigades within Australia. *Fire*. 1991. Vol. 84. № 1032. P. 21, 23–24.
271. Holmes A. Risk management challenges for complex infra projects. *Infrastructure Journal Supporting Infrastructure Investment*. British Consulting. URL: <http://www.britishconsulting.com/en/i.journal-aug-2011-risk-management.pdf>.
271. Holmes A. Risk management challenges for complex infra projects. / *Infrastructure Journal Supporting Infrastructure Investment*. British Consulting. URL: <http://www.britishconsulting.com/en/i.journal-aug-2011-risk-management.pdf>.
272. Hulida E., Koval O. Mathematical model of the optimization of fire extinguishing time length in the woodworking enterprises` workshops. *Econtechmod*. Lublin; Rzeszow, 2015. Vol. 4. № 1. P. 18–25.

273. Hulida E. M., Movchan I. O. Reliability of technology of fire extinguishing at the machine-building enterprises. *International scientific-practical conference Fire protection 2004*. Czech Republic: Technical University of Ostrava, 2004. P. 10–14.

274. Hulida E. M., Movchan I. O. About some features of the organization of struggle against mountain forest fires. *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. URL: <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. Vol. 1. № 1. P. 27–40.

281. Kumar S., Cox G. Mathematical modelling of fire in road tunnels – validation of JASMINE. Transport and Road Research Laboratory Contractor.

282. Kumar S., Cox G. Mathematical modeling of fire in road tunnels – validation of JASMINE. *Transport and Road Research Laboratory Contractor*. 1986. Report № 28.

283. Lewis M. J., Rubini P. A., Moss J. B. Field Modeling of Non-Charring Flame Spread. *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. № 3 (10). P. 82–94.

285. Linkov I. From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent 306 developments and applications. *Environment International* 32. 2006. 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. 16th Sump. (Int.) Combust. The Combustion Institute. Pittsburg, 1976.

290. Miles S. D., Kumar S., Cox G. Comparison of «Blind Prediction» of a CFD Model with Experimental Data. *Sixth International Symposium on Fire Safety Science*. France, 1999.

291. Modeling Fire Hazard (2016). URL: <http://www.esri.com/news/-arcuser/0700/files/firemodel.pdf>.

292. Modern House Fires: Effects of Research on Strategy and Tactics (2016). URL: <http://www.firerescuemagazine.com/.../strategy...tacti>.

293. Morita M., Yamauchi Y., Manmoto A. Numerical simulation of fire temperature stratified atrium with a mathematical field model. *Fire Sci. and Technol.* 1992. Vol. 12. № 1. P. 23–27.

294. Muzy A., Innocenti E., Aiello A., Santucci J.-F., Wainer G. Cellular Automata Based Simulation for Smoke and Fire Spreading in Large Buildings. *Simulation*. 2005. Vol. 81. № 2. P. 103–117.

295. Norman J. Fire Officer's Handbook of Tactics PennWell, 2005. 466 p. URL: <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. Vol. 27. № 1. P. 69–84.
297. Novozhilov V. Computational fluid dynamics modeling of compartment fires. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article>.
298. Ortlichkeit – Prinzipat Oberste Prioritat. Feuerwerhmann. 1994. № 12. S. 366–368.
299. Peacock R. D., Forneue G. P., Reneke P., Portier R., Jones W. W. CFAST the consolidated model of fire growth and smoke transport. NIST Technical Note 1299, NIST, U.S. Dept. of Commerce, Gaithersburg, 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 (Xa 1). P. 124–129.
301. Raycraft J., Keller V. D., Yang H. Q., Yang K. T. Fire spread in a three-dimensional pressure vessel with radiation exchange and wall heat losses. *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. *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., Notario P. P., Moreno F. G. On the flight path and the lifetime of burning patches of wood. 10-th Symposium (int.) on Combustion. Pittsburgh, 1965. P. 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. Gaitherburg: 1NEL, 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*. 1981. № 3. 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. Vol. 26. № 1. P. 35–90.
314. Wu Y., Bakar M. Z. Interaction of fire plume with inclined surface. *Fire Safety Journal*. 2000. Vol. J5. P. 363–390.