

УДК 614.843 (075.32)

М.І. Васильєв¹,
І.О. Мовчан¹, канд. техн. наук, доц.,
О.М. Коваль², канд. техн. наук

1 – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м.Львів, Україна, e-mail: nikita888hans@ukr.net; movchan_75@mail.ru

2 – Національний університет цивільного захисту України, м.Харків, Україна

ЗМЕНШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЄКТІВ СИСТЕМИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ НА СКЛАДАХ ЛІСОМАТЕРІАЛІВ

M.I. Vasiliev,
I.O. Movchan, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
O.M. Koval, Cand. Sci. (Tech.)

1 – Lviv State University of Safety of Vital Functions, Lviv, Ukraine, e-mail: nikita888hans@ukr.net, movchan_75@mail.ru

2 – National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine

DIMINISHING OF ECOLOGICAL RISK VIA OPTIMIZATION OF FIRE-EXTINGUISHING SYSTEM PROJECTS IN TIMBER-YARDS

Мета. На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розробити метод встановлення залежності екологічного ризику від пожежного на шахтних складах лісоматеріалів та його зменшення за рахунок впровадження оптимальних проєктів системи пожежогасіння.

Методика. Для розв'язування цієї задачі використовувалися основні положення теорії надійності. За основу для визначення екологічного ризику був прийнятий розподіл Вейбулла, що у відповідності до значень параметра форми густини розподілу може переходити в експоненціальний розподіл або в нормальний. До значення екологічного ризику був введений пожежний ризик, а також імовірність присутності людей на робочих місцях, імовірність успішної евакуації людей на випадок пожежі, імовірності безвідмовної роботи систем оперативного зв'язку та автоматичного пожежогасіння. Для визначення забруднення навколишнього середовища продуктами пожежі використовувалися залежності, до складу яких входили питомі значення можливих викидів токсичних продуктів (стехіометричні коефіцієнти).

Результати. Зменшення екологічного ризику досягнуто за рахунок впровадження на відкритому шахтному складі лісоматеріалів оптимальних проєктів системи пожежогасіння. Отримані результати дозволяють виконувати аудит відкритих шахтних складів лісоматеріалів з точки зору екологічної безпеки та управляти нею. Крім цього, результати роботи можуть використовуватися для визначення кількісної складової викидів токсичних продуктів, що переходять до навколишнього середовища від горіння при пожежі лісоматеріалів відкритих складів.

Наукова новизна. Уперше отримані залежності для визначення екологічного ризику та встановлена його залежність від пожежного ризику. Розроблена методологія визначення екологічного забруднення навколишнього середовища від пожеж на відкритих складах лісоматеріалів з урахуванням погодних факторів і середовища для розповсюдження токсичних продуктів.

Практична значимість. Рекомендується для впровадження у практику експлуатації відкритих шахтних складів лісоматеріалів, у практику адміністративно-господарської діяльності керівництва шахт з метою забезпечення екологічної безпеки, а також у практичну роботу науково-дослідних і проєктно-конструкторських інститутів при проєктуванні відкритих складів лісоматеріалів, до навчального процесу вищих технічних навчальних закладів при вивченні дисциплін екологічної спрямованості.

Ключові слова: екологічна безпека, екологічний ризик, пожежний ризик, токсичні продукти, викиди

Постановка проблеми. Відомо, що екологічна безпека – стан захищеності довкілля та життєво важливих інтересів людини й громадянина від можливої негативної дії господарської та іншої діяльності й загроз виникнення надзвичайних ситуацій природного й техногенного характеру та їх наслідків. У поняття екологічної безпеки входить система регулювання й управління, що дозволяє прогнозувати, не допускати, а у разі виникнення, ліквідувати розвиток надзвичайних ситуацій. Екологічна безпека реалізується на гло-

бальному, регіональному й локальному рівнях. Локальний рівень включає міста, райони, підприємства металургії, хімічної, нафтопереробної, гірничодобувної промисловостей та інших. Для локального рівня розроблено дуже багато заходів і технологій, що дозволяють на певному рівні забезпечувати екологічну безпеку. У цьому напрямі виконано багато робіт, результати яких на сучасному етапі, до деякої міри, дозволяють підвищувати ефективність захисту від забруднення навколишнього середовища. Цими роботами займалися відомі вчені: А.Л. Большеротов, В.І. Коробкін, Л.В. Передельський, Є.О. Лобанова, І.І. Мазур,

О.І. Молдаванов, М.Г.Рибальский, Т.А. Хоружая, А.Г. Шмаль та багато інших. Дослідженнями проблеми екологічних ризиків займалися такі вчені, як В.І. Андрейцев, Г.І. Балок, Н.О. Корнякова, Л. Решітник, Т.О. Третяк, М. Фролов, Т.М. Чебан, А.В. Яблоков та інші. Але розроблені ними методи стосуються лише теоретичних підходів до цієї проблеми, а також питань очищення води від токсичних речовин, боротьби зі знищенням регіональних і локальних зелених насаджень тощо. Дуже мало робіт присвячено забрудненню навколишнього середовища токсичними викидами від пожеж. Особливо це стосується пожеж на складах лісоматеріалів, де в цій локальній зоні температура середовища перевищує 70°C, густина кисню може стати меншою ніж 0,226кг/м³, а також може в цій зоні збільшитися вище норми густина оксиду вуглецю CO > 0,00116кг/м³, вуглекислого газу CO₂ > 0,11кг/м³, хлористого водню HCl > 23·10⁻⁶кг/м³ та інших токсичних речовин, що можуть загрожувати життю людини. Крім цього, у процесі пожежі утворюється дим, оптична густина якого може бути більша допустимого значення (допустима оптична густина диму $\mu \leq 1,2$ Нп/м, що забезпечує видимість до 2м, тобто в межах росту людини, яка при переміщенні повинна бачити підлогу). Такі обставини призводять до перевищення граничнодопустимого екологічного ризику та, відповідно, до забруднення навколишнього середовища.

Підтвердженням цього є дані статистики по кількості пожеж в Україні, у тому числі й на складах лісоматеріалів. Ці дані вказують на те, що кількість пожеж з кожним роком зростає. Наприклад, у 2012 році, у порівнянні з 2011 роком, їх кількість зросла на 17,5%, а прямі збитки з 828958тис.грн зросли до 856701тис.грн [1]. При цьому відсутні дані по забрудненню навколишнього середовища токсичними речовинами, що призводять до порушення екологічної безпеки.

Тому виникає проблема з невизначеністю зв'язку між пожежними та екологічними ризиками, а розв'язок цієї проблеми дозволить з певною ймовірністю прогнозувати екологічну безпеку на локальному рівні та попереджати загрозу, яка може виникнути при її аудиті, наприклад, на шахтних складах лісоматеріалів.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Однією з перших наукових праць із розвитку та поширення пожеж на відкритих складах пиломатеріалів за результатами експериментальних досліджень була оприлюднена робота С.С. Tarifa, Р.Р. Notario на 10-му Симпозіумі з процесів горіння на пожежах у 1965 році в м.Піттсбург (США). Механізм поширення пожежі був представлений у вигляді розповсюдження іскор і головешок, що горять, які розлітаються під дією конвективної колонки, що утворюється над осередком пожежі. Цей механізм поширення пожежі на відкритих складах був розвинутий у кандидатській дисертації М.С. Артемьева, що була захищена в 1981 році в м.Москва (ВІПТШ).

Заслужують уваги результати роботи П.П. Девлишева, що була опублікована у збірнику наукових праць ВНДІПО (м.Москва) в 1977 році. У цій роботі автор розглядав процеси горіння штабелів на моде-

лях. Було встановлено вплив геометричних розмірів штабелів і окремих елементів пиломатеріалів, густини розподілу в певному об'ємі пожежного навантаження на фізичні чинники горіння. Результати роботи не дозволили отримати критеріальних рівнянь, але були встановлені закономірності горіння штабелів. За результатами цієї роботи іншими авторами були отримані емпіричні залежності для визначення швидкості розповсюдження фронту пожежі по штабелям на складах пиломатеріалів. Але отримані залежності неможливо було використовувати для розрахунку швидкості розповсюдження фронту пожежі по території складу пиломатеріалів, тому що вони не враховували протипожежних розривів між штабелями.

Останнім часом при розгляді процесу розповсюдження пожежі по території складу пиломатеріалів використовують математичні моделі, що враховують теплове випромінювання, від якого нагрівається поверхня деревини сусіднього штабеля від факелу полум'я штабеля, що горить. Крім цього, необхідно враховувати перекидання вітром іскор і головешок, що горять, на деревину сусіднього штабеля, які також сприяють поширенню пожежі, обов'язково враховувати вплив вітру на положення факела у просторі [2].

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

Мета роботи. На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розробити метод встановлення залежності екологічного ризику від пожежного на відкритих шахтних складах лісоматеріалів та його зменшення за рахунок впровадження оптимальних проектів системи пожежогащення.

Виклад основного матеріалу. Метод встановлення залежності екологічного ризику від пожежного для шахтних складів лісоматеріалів та управління екологічною безпекою заходами системи пожежогащення. Проблемою аналізу та управління пожежними ризиками останнім часом займаються в багатьох країнах світу. Значний вклад у розвиток цього напряму науки внесло багато вчених, у числі яких М.М. Брушлінський, В.В. Холщевніков, Д.О. Самошин, В.В. Бегун та інші. Згідно з рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я, пожежні ризики класифікують так: 1) незначний ризик $\varepsilon \leq 10^{-6}$; 2) прийнятний ризик $\varepsilon = 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}$; 3) високий (терпимий) ризик $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4}$; 4) неприйнятний ризик $\varepsilon > 5 \cdot 10^{-4}$.

Перші спроби теоретично визначити значення пожежного ризику для споруд виробничого призначення наведені в роботі [3]. За основу для визначення пожежного ризику ε був прийнятий розподіл Вейбулла, тобто

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\tau}{a} \right)^b \right], \quad (1)$$

де a – параметр масштабу часу напрацювання на відмову устаткування; b – параметр форми кривої розподілу; τ – загальне значення часу роботи об'єкта.

Аналізуючи основні положення теорії надійності, було встановлено, що для обґрунтованого вибору математичної моделі визначення пожежного ризику найбільш доцільно використовувати розподіл Вейбулла (1). Густина розподілу кривої Вейбулла можна визначити за залежністю

$$f(\tau) = \frac{b}{a} \left(\frac{\tau}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\tau}{a}\right)^b\right]. \quad (2)$$

У залежності (2) параметр масштабу a приймає середнє значення максимального можливого часу напруження T_B того чи іншого елемента об'єкта, при досягненні якого існує ймовірність виникнення пожежі внаслідок його відмови; τ – загальне поточне значення часу роботи того чи іншого елемента об'єкта у процесі його експлуатації.

Крім цього, встановлено, що коли параметр форми кривої розподілу $b \leq 1$, то розподіл Вейбулла перетворюється в експоненціальний, що визначають за залежністю

$$f(\tau) = \lambda \exp(-\lambda \tau), \quad (3)$$

де $\lambda = 1/a$ – інтенсивність відмов устаткувань.

Тоді пожежний ризик з використанням залежності (3) можна визначити так

$$\varepsilon = \int_0^{\tau} \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau = 1 - e^{-\lambda \tau} = 1 - \exp(-\lambda \tau). \quad (4)$$

У випадку, коли параметр форми кривої розподілу $1 < b \leq 2$, то пожежний ризик можна визначити з використанням розподілу Вейбулла за залежністю (1).

Для параметра форми кривої розподілу $b > 2$, пожежний ризик можна визначити з використанням нормального розподілу за залежністю

$$\varepsilon = 0,5 + \Phi(u_p), \quad (5)$$

де $\Phi(u_p)$ – функція Лапласа (ця функція є непарною, тобто $\Phi(-u_p) = -\Phi(u_p)$); u_p – квантиль нормального розподілу випадкової величини

$$u_p = \frac{\tau - T_B}{S_\tau},$$

де S_τ – середнє квадратичне відхилення напруження τ устаткування на відмову.

При визначенні функції Лапласа за залежністю (5) необхідно спочатку визначити квантиль нормального розподілу для відповідного часу τ , а потім за допомогою довідникової літератури, в якій розміщені таблиці функції Лапласа, вибрати значення $\Phi(u_p)$.

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

У свою чергу, загальний пожежний ризик будь-якого об'єкта залежить від пожежних ризиків його складових елементів протипожежного захисту. У цьому випадку, виходячи з того, що всі чинники, які впливають на кожний ризик, діють паралельно, то використавши основні положення теорії надійності, загальний пожежний ризик ε_o для об'єкта можна визначити за залежністю

$$\varepsilon_o = \prod_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad (6)$$

де ε_i – ризик відмови відповідного елемента об'єкта, що визначають у залежності від виду розподілу кривої за залежностями (1), (4) або (5); n – загальна кількість складових елементів протипожежного захисту об'єкта.

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

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

На території відкритих складів лісоматеріалів слід передбачати адресну електричну пожежну сигналізацію з ручними пожежними сповіщувачами. Пожежні сповіщувачі слід встановлювати по протипожежних розривах між окремими групами штабелів на негорючих опорах і на висоті 1,35м від землі. Сповіщення людей про пожежу слід виконувати на території відкритих складів по гучномовному розпорядливо-пошуковому диспетчерському зв'язку та звуковій сигналізації (сирени, дзвони тощо). За наявності устаткування диспетчерського телевізійного спостереження за техногенним процесом на складі лісоматеріалів їх слід використовувати й для спостереження за протипожежним режимом на території.

На відкритих складах лісоматеріалів сумарною місткістю до 10 000 щільних м^3 повинні бути протипожежний водопровід низького тиску та насосні станції протипожежного водопроводу. Насосні станції слід розмі-

щувати на відстані не менше 40м від штабелів. Насосні станції необхідно, як правило, передбачати з управлінням без обслуговуючого персоналу: автоматичним або дистанційним із приміщення чергового персоналу.

Виходячи з наявності на відкритих складах лісоматеріалів елементів запобігання виникнення та попередження розповсюдження пожежі, пожежний ризик для шахтного складу ε_o можна визначити з використанням залежності (6), а саме

$$\varepsilon_o = \varepsilon_c \varepsilon_{z,c} \varepsilon_{m,c} \varepsilon_{e,m} \varepsilon_{n,c}, \quad (7)$$

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

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

- пожежних сповіщувачів розподіл відповідає експоненціальному при $b = 1$;
- звукової сигналізації розподіл відповідає експоненціальному при $b = 1$;
- телевізійної системи спостереження розподіл відповідає розподілу Вейбулла при $b = 2$;
- електричної мережі розподіл відповідає розподілу Вейбулла при $b = 2$;
- насосної станції розподіл відповідає нормальному розподілу при $b = 2,5$ і $S_\tau = 2920$ год.

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

Для сповіщувачів, згідно з ДСТУ EN 54, $a_c = T_{B,c} = 10 \cdot 365 \cdot 24 = 87600$ год; $\lambda_c = 1/T_{B,c} = 1/87600 = 1,14 \cdot 10^{-5}$ відмов/год; $\tau_c = 43800$ год. Тоді за залежністю (4) 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 за залежністю (4). При цьому, згідно з рекомендаціями, що базуються на дворічному терміні гарантії на радіоелектронну апаратуру, визначаємо $a_{z,c} = T_{B,z,c} = 2 \cdot 365 \cdot 24 = 17520$ год; $\lambda_{z,c} = 1/T_{B,z,c} = 1/17520 = 5,7 \cdot 10^{-5}$ відмов/год; $\tau_{z,c} = 8760$ год. У цьому випадку отримаємо

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

Аналогічно визначаємо ризик відмови телевізійної системи спостереження за залежністю (1)

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

Згідно з правилами влаштування електроустановок, час напрацювання електричної мережі на відмову складає 20 років. Тоді $a_{e,m} = T_{B,e,m} = 20 \cdot 365 \cdot 24 = 175200$ 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 електроустановок, 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 функцій Лапласа у довідковій літературі, отримаємо

$$-\Phi(3) = -0,4986.$$

Тоді, з урахуванням залежності (5), отримаємо

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

У нашому випадку, з урахуванням залежності (7), пожежний ризик для відкритого шахтного складу лісоматеріалів буде

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

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

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

На *першому етапі* визначимо об'єм розповсюдження продуктів горіння, що виділяються з площі пожежі на відкритому шахтному складі лісоматеріалів. Для цього скористуємося відомими даними роботи [2]. Висота полум'я від основи штабеля при швидкості вітру $V_6 = 4$ м/с становить 6м. Напрямок вектору швидкості вітру співпадає з напрямом повздовжніх рядів штабелів (найгірший варіант). Висота конвективної колонки з продуктами горіння за відомими даними для лісових пожеж у 20...30 разів більша за висоту полум'я. Швидкість розповсюдження фронту пожежі V_ϕ по відкритому складу лісоматеріалів при швидкості вітру $V_6 = 4$ м/с знаходиться в межах: за початковий час $\tau_1 = 10$ хв – $V_{\phi 1} = 1,5$ м/хв, потім зрос-

тає до $V_{\phi 2} = 3,3$ м/хв. Розглянемо випадок, коли пожежа переміщується вздовж повздовжніх рядів. Загальна довжина кварталу відкритого шахтного складу лісоматеріалів дорівнює 193 м. За початковий час $\tau_1 = 10$ хв пожежа розповсюдиться на довжину, що дорівнює $l_{\Pi 1} = V_{\phi 1} \cdot \tau_1 = 1,5 \cdot 10 = 15$ м. Залишок довжини кварталу складу $l_{\Pi 2} = 193 - 15 = 178$ м буде охоплений полум'ям за $\tau_2 = 178/3,3 = 53,9$ хв, тобто весь квартал складу буде охоплений пожежею за час $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 63,9$ хв. За цей час продукти горіння, що знаходяться в конвективних колонках, від швидкості вітру перемістяться на відстань $V_e \cdot \tau = 4 \cdot 60 \cdot 63,9 = 15336$ м. Тоді загальна площа розповсюдження продуктів горіння складатиме $S_{n,z} = 94 \cdot (193 + 15336) = 1459726 \text{ м}^2 \approx 146$ га. При середньому значенні висоти конвективної колонки $H = 6 \cdot 25 = 150$ м об'єм розповсюдження продуктів горіння над кварталом складу, що охоплений пожежею, буде дорівнювати $V_{n,z} = S_{n,z} \cdot H = 1459726 \cdot 150 = 218958900 \text{ м}^3$.

Згідно з довідковою літературою, для керівника гасіння пожежі відомо, що швидкість вигорання деревини у 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 $S_{\Pi} = 94 \cdot 193 = 18142 \text{ м}^2$ у навколишнє середовище за допомогою конвективних колонок перейде продуктів горіння, кг

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

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 $V_{n,z}$ [5], кг:

- диоксиду вуглецю

$$m_{CO_2} = m L_{CO_2} = 7419353 \cdot 1,57 = 11648384;$$

- оксиду вуглецю

$$m_{CO} = m L_{CO} = 7419353 \cdot 0,024 = 178064;$$

- оксидів азоту

$$m_{NO_x} = m L_{NO_x} = 7419353 \cdot 0,003 = 22258;$$

- синильної кислоти

$$m_{HCN} = m L_{HCN} = 7419353 \cdot 0,00003 = 223;$$

- акролеїну

$$m_{AKP} = m L_{AKP} = 7419353 \cdot 0,004 = 29677;$$

- споживання кисню

$$m_{O_2} = m L_{O_2} = 7419353 \cdot (-1,15) = -8532255.$$

Визначаємо концентрацію токсичних продуктів, що знаходяться в об'ємі навколишнього середовища $V_{n,z}$, за залежністю, г/м³

$$K_i = \frac{10^3 m_i}{V_{n,z}}$$

та порівнюємо з допустимим значенням, г/м³:

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

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

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

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

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

зменшення густини кисню, г/м³

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

оптична густина диму μ [6]

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

де $c_p \approx 10^3$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹ – ізобарна теплоємність газового середовища; $\rho_0 \cdot T_0 \approx 3 \cdot 10^2$ кг·м⁻³·К; $\eta \approx 1$ – коефіцієнт повноти згорання; значення $\varphi \approx 0,5$ – коефіцієнт тепловтрат; Q_{\min} – найнижча теплота згорання, Дж/кг; ψ_n – питома швидкість вигорання, кг/м²с; D – димоутворююча здатність, Нп·м²/кг наведені в ГОСТ 12.1.004 – 91 (додаток 4);

$$\mu = \frac{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 57}{14000 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot (1 - 0,5)} \times \left[1 - \exp \left(- \frac{0,0145 \cdot 18142 \cdot 1 \cdot 14000 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,5)}{10^3 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 218958900} 63,9 \cdot 60 \right) \right] = 0,25,$$

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

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

Наприклад, при зменшенні швидкості вітру у два рази, а саме з 4 до 2 м/с, зменшується площа розповсюдження продуктів горіння. У нашому прикладі з 146 до 73,9 га. Відповідно, зменшується об'єм розповсюдження продуктів горіння також приблизно у два рази, що призводить до збільшення концентрації токсичних продуктів у два рази. У цьому випадку на площі 73,9 га в районі, що належить відкритому шахтному складу лісоматеріалів, навколишнє середовище буде забруднене недопустимою концентрацією для життя людини оксидом вуглецю ($K_{CO} = 1,6$ г/м³), акролеїном ($K_{AKP} = 0,272$ г/м³) та зменшенням густини кисню до 192 г/м³, що унеможливило перебування людини на цій території.

Крім того, гранична видимість від задимлення зменшується до 4 м, що призводить до неможливості використовувати автомобільний транспорт для переміщення пожежно-рятувальних підрозділів.

З іншого боку, зменшення часу вільного горіння призводить до зменшення площі пожежі. При цьому

зменшується перехід за допомогою конвективних колонок продуктів горіння до навколишнього середовища, тобто зменшується концентрація токсичних продуктів і димовиділення. Зменшення часу вільного горіння можливе за умови впровадження оптимальних проектів пожежогасіння, що 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 до місця виклику пожежно-рятувальних підрозділів приблизно на 18...20%.

Крім цього, для початкової локалізації пожежі, до приїзду пожежно-рятувальних підрозділів, по периметру складу доцільно встановлювати *автоматичну водяну оренчерну систему пожежогасіння*, що буде працювати на тих ділянках, де виникла пожежа, тобто на ділянках, звідки був поданий 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 фактору (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 випадку її виникнення є впровадження на відкритих складах лісоматеріалів *добровільних пожежних команд* із забезпеченням цих команд пожежним спорядженням (захисний одяг, пожежні рукава, ручні пожежні стовпи тощо).

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

Визначення екологічного ризику ε_e , виходячи з основних положень екологічної безпеки, будемо здійснювати за залежністю

$$\varepsilon_e = \varepsilon_o P_{np.l} (1 - P_{ev.l}) (1 - R_{cn}(\tau)) (1 - R_{авт}(\tau)) \leq [\varepsilon_e], \quad (8)$$

де ε_o – пожежний ризик для відкритого шахтного складу лісоматеріалів, визначений за залежністю (7); $P_{np.l}$ – імовірність присутності людей на складі лісоматеріалів; $P_{ev.l}$ – імовірність успішної евакуації людей зі складу лісоматеріалів при виникненні пожежі; $R_{cn}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи системи оперативного сповіщення; $R_{авт}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи автоматичної системи пожежогасіння; $[\varepsilon_e] = 10^{-7}$ – допустиме значення прийнятого екологічного ризику (якщо $[\varepsilon_e] = 10^{-6}$, то таке значення відповідає гранично-допустимому значенню екологічного ризику). Для довідки: ризик пожежі в Росії $2,07 \cdot 10^{-4}$; у США – $4,4 \cdot 10^{-5}$; в Японії – $4,8 \cdot 10^{-5}$; у Великобританії та Франції – $6,8 \cdot 10^{-5}$. Значення таких ризиків відповідають загрози екологічній безпеці.

Розглянемо визначення невідомих складових залежності (8).

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

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

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

2. *Імовірність успішної евакуації людей $P_{ev.l}$* зі складу лісоматеріалів

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

де τ_k – критичний час пожежі, тобто час, протягом якого ще не виникає загроза від пожежі для навколишнього середовища та життєво важливих інтересів людини, хв (для відкритих складів лісоматеріалів $\tau_k = 5 \dots 10$ хв); τ_e – час тривалості евакуації людей з території складу до місця збору, хв.

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

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

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

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

де $\lambda_{cn} = 5,7 \cdot 10^{-5}$ – 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 $R_{авт}(\tau)$ необхідно розрахувати квантиль нормального розподілу з урахуванням кількості вмикань τ системи за термін експлуатації, допустимої кількості вмикань системи до напрацювання на відмову $T_{B.авт} = 5$ вмикань згідно з ГОСТ Р 53288-2009, середнього квадратичного відхилення кількості вмикань $S_\tau = 1,7$ та функції Лапласа.

Розглянемо для нашого прикладу *визначення екологічного ризику* за умови, що час присутності людей на робочих місцях відкритого складу лісоматеріалів $\tau_{np.l} = 8$ год, критичний час пожежі $\tau_k = 7$ хв, кількість евакуаційних шляхів $k = 2$, час від початку пожежі до початку евакуації $\tau_{n.e} = 4$ хв, шлях евакуації до місця збору $L_e = 400$ 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 з використанням залежності (8).

1. Пожежний ризик $\varepsilon_o = 1,04 \cdot 10^{-5}$.

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

$$P_{пр.л} = \frac{8}{24} = 0,3333.$$

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

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

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

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

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

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, отримаємо

$$-\Phi(2,35) = -0,4905;$$

тоді

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

Визначаємо екологічний ризик за залежністю (8)

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

Результати розрахунків показали, що екологічна безпека від пожежі на відкритому шахтному складі лісоматеріалів забезпечена. Це підтверджується значенням екологічного ризику, який менше допустимого прийнятного значення. На забезпечення екологічної безпеки для нашого прикладу, у першу чергу, впливає впровадження оптимальних проектів системи пожежогасіння. Звідси можна зробити висновок, що екологічною безпекою можна керувати за рахунок практичної реалізації адміністративно-правових і економічних методів, а саме необхідно додатково впровадити систему оперативного сповіщення про пожежу, автоматичну водяну систему пожежогасіння, а також організувати добровільну пожежну ко-

манду. Ці заходи потребують для впровадження додаткових капіталовкладень і коштів, але їх окупність очевидна.

Висновки.

1. Встановлено, що екологічний ризик при ймовірності виникнення пожежі на відкритих шахтних складах лісоматеріалів, у першу чергу, залежить від пожежного ризику. Зменшення пожежного ризику призводить до зменшення екологічного ризику.

2. На екологічну безпеку у значній мірі впливає швидкість вітру. Зменшення швидкості вітру при пожежі на відкритих складах лісоматеріалів у два рази, а саме, наприклад, з 4 до 2м/с, зменшує площу розповсюдження продуктів горіння у два рази, і, у багатьох випадках, навіть унеможлиблює перебування людини на цій території.

3. Екологічною безпекою на відкритих складах лісоматеріалів можна керувати за рахунок практичної реалізації адміністративно-правових і економічних методів.

4. Необхідна подальша робота з метою вдосконалення та спрощення методології управління екологічною безпекою навколишнього середовища на відкритих шахтних складах лісоматеріалів за рахунок розроблення конкретних заходів її забезпечення та затвердження нормативних документів.

Список літератури / References

1. Климась Р. Аналіз пожеж і причин виникнення їх в Україні у 2012 році / Р. Климась, Д. Матвійчук // Спецпожежсервіс, „Пожежна безпека“. – 2013. – № 2 (161). – С. 24–26.

Klymas, R. and Matviichuk, D. (2013), “Analysis of fires and its causes in Ukraine in 2012”, *Pozhezna Bezpeka*, no. 2(161), *Spezpozogtehnika*, pp. 24–26.

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

Koval, O.M. (2013), “Simulation of development and distribution of fire in a timber yard”, *Naukovyi Visnyk NLTU Ukrainy*, NLTU of Ukraine, Lviv, Issue 23.10, pp. 303–313.

3. Холщевников В.В. Проблемы оценки безопасности людей при пожаре в уникальных зданиях и сооружениях / В.В. Холщевников // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – № 4. – С. 21–27.

Kholshchevnikov, V.V. (2003), “Problems of estimation of people safety in a fire emergency in buildings of unique design”, *Pozharovzryvobezopasnost*, no. 4, pp. 21–27.

4. Склады лесных материалов. Противопожарные нормы РФ: СНиП 21-03-2003. – М.: „Пожарный Центр“, 2003. – 18 с.

SNiP 21-03-2003. (2003), *Storages of forest materials. Fire-prevention norms of Russian Federation*, *Pozharnyi Tsentri*, Moscow, Russia.

5. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Кошмаров Ю.А. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

Koshmarov, Yu.A. (2000), "Prognostication of dangerous factors of indoor fire", Academy of GPS of MVD of Russia, Moscow, Russia.

6. Гуліда Е.М. Прогнозування величини оптичної густини диму при пожежі у приміщенні: збірник наукових праць „Пожежна безпека“ / Е.М. Гуліда – Львів: ЛДУ БЖД, 2011. – №18. – С. 65–70.

Gulida, E.M. (2011), "Prognostication of smoke density in a fire emergency in buildings", *Pozhezhna Bezpeka*, no. 18, LDU BGD, Lviv, pp. 65–70.

Цель. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработать метод установления зависимости экологического риска от пожарного на шахтных складах лесоматериалов и его уменьшение за счет внедрения оптимальных проектов системы пожаротушения.

Методика. Для решения этой задачи использовались основные положения теории надежности. За основу для определения экологического риска было принято распределение Вейбулла, которое в соответствии со значением параметра формы плотности распределения может переходить в экспоненциальное распределение или в нормальное. В значение экологического риска был введен пожарный риск, а также вероятность присутствия людей на рабочих местах, вероятность успешной эвакуации людей в случае пожара, вероятности безотказной работы систем оперативной связи и автоматического пожаротушения. Для определения загрязнения окружающей среды продуктами пожара использовались зависимости, в состав которых входили удельные значения возможных выбросов токсичных продуктов (стехиометрические коэффициенты).

Результаты. Уменьшение экологического риска достигнуто за счет внедрения на открытом шахтном складе лесоматериалов оптимальных проектов системы пожаротушения. Полученные результаты позволяют выполнять аудит открытых шахтных складов лесоматериалов с точки зрения экологической безопасности и управлять ею. Кроме этого, результаты работы могут использоваться для определения количественной составляющей выбросов токсичных продуктов, которые переходят в окружающую среду от горения при пожаре лесоматериалов открытых складов.

Научная новизна. Впервые получены зависимости для определения экологического риска и установлена его зависимость от пожарного риска. Разработана методология определения экологического загрязнения окружающей среды от пожаров на открытых складах лесоматериалов с учетом погодных факторов и среды для распространения токсичных продуктов.

Практическая значимость. Рекомендуются для внедрения в практику эксплуатации открытых шахтных складов лесоматериалов, в практику административно-хозяйственной деятельности руководства

шахт с целью обеспечения экологической безопасности, а также в практическую работу научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов при проектировании открытых складов лесоматериалов, в учебный процесс высших технических учебных заведений при изучении дисциплин экологической направленности.

Ключевые слова: *экологическая безопасность, экологический риск, пожарный риск, токсичные продукты, выбросы*

Purpose. To develop the method of estimation of dependence of ecological risk from fire in mine timber-yards and its reduction via introduction of optimum projects of fire-extinguishing systems.

Methodology. To solve the problem the foundations of the reliability theory were used. We determined the ecological risk based on Weibull distribution which can pass into an exponential distribution or in a normal one depending on the value of parameter of distribution density form. In the value of ecological risk we included the fire risk, probability of presence of people at workplaces, probability of successful evacuation of people in case of fire, probabilities of faultless work of operative communication and automatic distinguishing networks. For determination of contamination of the environment with the combustion products we used functions including specific values of possible emissions of toxic products (stoichiometric coefficients).

Findings. Reduction of the ecological risk has been achieved due to introduction of optimum projects of the distinguishing system in open mine timber-yards. The results allow us to audit the open mine timber-yards in the context of ecological safety and control it. The findings can be used for quantitative evaluation of toxic products entered the environment during the fire in timber-yards.

Originality. For the first time we have determined the dependence of the ecological risk and on the fire risk. We have developed the method of determination of ecological contamination of the environment by fires on the open timber-yards taking into account the weather factors and environment for distribution of toxic products.

Practical value. We recommend the results for introduction in practice of exploitation of the open mine timber-yards; administration and maintenance activity in mines to provide ecological safety; in practice of research and design-and-engineering institutes for design of the open timber-yards; and into the educational process of higher technical educational establishments teaching ecological disciplines.

Keywords: *ecological safety, ecological risk, fire risk, toxic products, emissions*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Ю.П. Рак. Дата надходження рукопису 01.10.13.